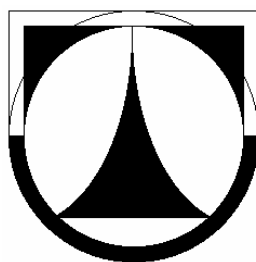


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**FAKULTA TEXTILNÍ**

KATEDRA NETKANÝCH TEXTILIÍ



**Diplomová práce**

**ZVUKOVĚ POHLTIVÉ MATERIÁLY  
Z DRUHOTNÝCH SUROVIN URČENÉ PRO POUŽITÍ  
V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU**

**SOUND ABSORBING MATERIALS FROM  
SECONDARY RAW MATERIAL INTENDED FOR  
USE IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY**

2008

SEDLÁKOVÁ LENKA

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA TEXTILNÍ**

**KATEDRA NETKANÝCH TEXTILIÍ**

**ZVUKOVĚ POHLTIVÉ MATERIÁLY Z DRUHOTNÝCH  
SUROVIN URČENÉ PRO POUŽITÍ V AUTOMOBILOVÉM  
PRŮMYSLU**

**SOUND ABSORBING MATERIALS FROM SECONDARY  
RAW MATERIAL INTENDED FOR USE IN THE  
AUTOMOTIVE INDUSTRY**

Autor diplomové práce: Lenka Sedláková

Vedoucí diplomové práce: Ing. Klára Kalinová, Ph.D.

***Rozsah práce:***

stran	obrázků	tabulek	pramenů	příloh
61	35	2	55	6

V Liberci dne 12. května 2008

# **Technická univerzita v Liberci**

Fakulta textilní

Katedra netkaných textilií

Školní rok 2007 - 2008

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Pro **Lenku Sedlákovou**  
obor: 3106-T004 Netkané textilie

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: **Zvukově pohltivé materiály z druhotných surovin určené pro použití v automobilovém průmyslu**

Zásady pro vypracování :

- 1) prostudujte teoretické poznatky o zvukově pohltivém chování vláknenných materiálů a poznatky o využití druhotných surovin v automobilovém průmyslu
- 2) připravte sérii vzorků
  - a) netkané textilie vyrobené kladením vrstev stejnorodého textilního materiálu o různém počtu vrstev, různé tloušťky zvukově pohltivého materiálu
  - b) nanovláknenné vrstvy nanesené na vláknenné materiály (viz. bod a) a kladené na požadované tloušťky
- 3) proměřte frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti vzorků v závislosti na druhu vláknenného materiálu, na tloušťce vzorku a počtu nanovláknenných vrstev
- 4) diskutujte závěry
  - a) vliv parametrů vzorků na průběh frekvenční závislosti činitele zvukové pohltivosti

## Prohlášení

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracovala jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním diplomové práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, dne 12. května 2008

.....

Podpis

## Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucí diplomové práce Ing. Kláře Kalinové, Ph.D., za její zájem, odborné rady, připomínky a trpělivost při vzniku této práce. Děkuji také své rodině za podporu během celého studia.

# Zvukově pohltivé materiály z druhotných surovin určené pro použití v automobilovém průmyslu

## Anotace

Tato diplomová práce se zabývá zvukově pohltivými vlastnostmi materiálů z druhotných surovin, které se používají v automobilovém průmyslu. Teoretická část obsahuje poznatky o zvukově pohltivém chování vláknenných materiálů a využití druhotných surovin v automobilovém průmyslu. Experimentální část se věnuje měření činitele zvukové pohltivosti vzorků v závislosti na druhu vláknenného materiálu, na tloušťce vzorku a počtu nanovláknenných vrstev. Pro výrobu netkaných textilií byly použity dva typy vláknenných materiálů. Jeden typ materiálu byl polyester a druhý typ byly druhotné suroviny. Závěrečná část vyhodnocuje vliv zkoumaných parametrů na průběh činitele zvukové pohltivosti.

**Klíčová slova:** druhotné suroviny, netkaná textilie, činitel zvukové pohltivosti, nanovláknna, polyester, automobilový průmysl

Sound absorbing materials from secondary raw material intended for use in the automotive industry

## Annotation

This diploma thesis deals with sound absorptive characteristics materials from secondary raw material, which is used in the automotive industry. The theoretic part contains findings about sound absorbing behavior of fibrous materials and uses secondary raw material in the automotive industry. The experimental part is devoted to the measurement of sound absorption coefficient samples depending on the type fibrous material, on the thickness sample and the number of nanofibres layers. Two fibrous materials were used in production of nonwoven textiles. One type material was polyester and the second type was secondary raw material. The final part evaluated of influence study parameters on course sound absorption coefficient.

**Key words:** secondary raw material, nonwoven textile, sound absorption coefficient, nanofibres, polyester, automotive industry

## Obsah

<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>2 TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>12</b>
2.1 TEORIE ZVUKU .....	12
2.1.1 Rozdělení akustiky.....	12
2.1.2 Zvuk jako mechanické vlnění .....	13
2.1.3 Základní veličiny a pojmy akustiky.....	14
2.1.4 Činitel zvukové pohltivosti.....	17
2.2 MECHANIKA POHLCOVÁNÍ ZVUKU.....	18
2.2.1 Porézní materiály.....	19
2.2.2 Obklady založené na rezonančním principu.....	21
2.3 METODY MĚŘENÍ Činitele ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI .....	24
2.3.1 Dvou-mikrofonová impedanční trubice .....	24
2.4 TEORIE VÝROBY NETKANÝCH TEXTILIÍ .....	27
2.4.1 Technologie výroby netkaných textilií .....	27
2.4.2 Vlákná pro výrobu netkaných textilií.....	27
2.4.2.1 Základní vlákna.....	28
2.4.2.2 Speciální vlákna.....	30
2.4.2.3 Nanovlákna .....	31
2.4.3 Elektrostatické zvlákňování .....	31
2.4.3.1 Princip elektrostatického zvlákňování .....	32
2.4.3.2 Metoda „Nanospider“ .....	34
2.5 REŠERŠE.....	34
2.5.1 Teoretické poznatky o zvukově pohltivém chování vláknenných .....	35
materiálů.....	35
2.5.2 Poznatky o využití DS v automobilovém průmyslu .....	39
<b>3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....</b>	<b>42</b>
3.1 CÍL .....	42
3.2 PŘÍPRAVA VLÁKENNÝCH VRSTEV A VÝROBA VZORKŮ.....	42
3.3 VÝROBA VZORKŮ Z PL.....	42
3.4 VÝROBA VZORKŮ Z DS .....	44
3.5 POUŽITÉ MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ .....	44
3.6 POSTUP MĚŘENÍ.....	44
3.7 OZNAČOVÁNÍ VZORKŮ .....	45
3.8 VYHODNOCOVÁNÍ GRAFŮ .....	46
3.9 STATISTIKA .....	46
<b>4 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ .....</b>	<b>48</b>
4.1 VLIV POČTU VRSTEV NA HODNOTU Činitele ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI .....	48
4.2 VLIV TLOUŠŤKY VZORKŮ NA HODNOTU Činitele ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI.....	50
4.3 VLIV DRUHU VLÁKENNÉHO MATERIÁLU NA HODNOTU Činitele ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI.....	52
<b>5 ZÁVĚR .....</b>	<b>54</b>
<b>6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>55</b>
<b>7 SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>60</b>

## Seznam použitých symbolů

<b>a</b>	[m]	délka desky
<b>b</b>	[m]	šířka desky
<b>c</b>	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost šíření zvuku
<b>c<sub>a</sub></b>	[m.N <sup>-1</sup> ]	akustická poddajnost
<b>d</b>	[m]	tloušťka vzduchového polštáře
<b>E</b>	[Pa]	modul pružnosti v tahu
<b>E<sub>dopadající</sub></b>	[J]	energie dopadající
<b>E<sub>odražená</sub></b>	[J]	energie odražená
<b>E<sub>pohlčená</sub></b>	[J]	energie pohlčená
<b>E<sub>prostoupená</sub></b>	[J]	energie prostoupená
<b>f</b>	[Hz]	frekvence kmitání (kmitočet)
<b>f<sub>r</sub></b>	[Hz]	rezonanční kmitočet kmitající membrány
<b>h</b>	[m]	tloušťka desky
<b>h</b>	[-]	poróznost
<b>H<sub>1</sub></b>	[Hz]	frekvenční přenosová funkce
<b>H<sub>i</sub></b>	[Hz]	frekvenční přenosová funkce spojená se složkou signálu od zdroje
<b>H<sub>r</sub></b>	[Hz]	frekvenční přenosová funkce spojená se složkou odraženého signálu
<b>I</b>	[W.m <sup>-2</sup> ]	intenzita zvuku
<b>I<sub>0</sub></b>	[W.m <sup>-2</sup> ]	prahová hodnota intenzity zvuku
<b>k</b>	[-]	konstanta struktury
<b>K<sub>1</sub></b>	[N.m <sup>-1</sup> ]	měrná tuhost rámu
<b>K<sub>2</sub></b>	[N.m <sup>-1</sup> ]	modul vzduchu
<b>l</b>	[m]	délka hrdla
<b>l'</b>	[m]	korigovaná tloušťka desky
<b>L<sub>I</sub></b>	[dB]	hladina intenzity zvuku
<b>L<sub>p</sub></b>	[dB]	hladina akustického tlaku
<b>L<sub>u</sub></b>	[dB]	hladina akustické rychlosti
<b>L<sub>W</sub></b>	[dB]	hladina akustického výkonu
<b>m</b>	[kg]	hmotnost membrány



---

<b>M</b>	[kg.m <sup>-2</sup> ]	plošná hmotnost desky
<b>m<sub>a</sub></b>	[kg]	akustická hmotnost
<b>p</b>	[Pa]	akustický tlak
<b>p<sub>0</sub></b>	[Pa]	prahová hodnota akustického tlaku
<b>p<sub>i</sub></b>	[Pa]	dopadající složka akustického tlaku
<b>p<sub>r</sub></b>	[Pa]	odražená složka akustického tlaku
<b>P<sub>0</sub></b>	[Pa]	atmosférický tlak
<b>R</b>	[-]	činitel zvukové odrazivosti
<b>R<sub>a</sub></b>	[Pa.s.m <sup>-3</sup> ]	akustický odpor
<b>s</b>	[-]	spojující parametr
<b>S</b>	[m <sup>2</sup> ]	plocha membrány
<b>S<sub>1</sub></b>	[m <sup>2</sup> ]	plocha otvoru v desce
<b>S<sub>2</sub></b>	[m <sup>2</sup> ]	plocha stěny připadající na jeden rezonátor
<b>T</b>	[s]	perioda kmitání
<b>u</b>	[m.s <sup>-1</sup> ]	akustická rychlost
<b>u<sub>0</sub></b>	[m.s <sup>-1</sup> ]	prahová hodnota akustické rychlosti
<b>v<sub>1</sub></b>	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost pevných částic (vláken)
<b>v<sub>2</sub></b>	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost vzduchu
<b>V</b>	[m <sup>3</sup> ]	objemu dutiny rezonátoru
<b>W</b>	[W]	akustický výkon
<b>W<sub>0</sub></b>	[W]	prahová hodnota akustického výkonu
<b>z</b>	[Pa.s.m <sup>-1</sup> ]	akustický vlnový odpor (impedance)
<b>α</b>	[-]	činitel zvukové pohltivosti (absorpce)
<b>β</b>	[-]	činitel zvukové odrazivosti (reflexe)
<b>λ</b>	[m]	vlnová délka
<b>ρ</b>	[kg.m <sup>-3</sup> ]	hustota vzduchu
<b>ρ<sub>1</sub></b>	[kg.m <sup>-3</sup> ]	hustota vlákenné fáze
<b>ρ<sub>2</sub></b>	[kg.m <sup>-3</sup> ]	hustota vzdušné fáze
<b>σ</b>	[-]	Poissonova elastická konstanta
<b>τ</b>	[-]	činitel zvukové průzvučnosti
<b>ω</b>	[rad.s <sup>-1</sup> ]	úhlová frekvence

# 1 Úvod

Za posledních pár století došlo k velkému nárůstu populace a mohutnému rozvoji techniky ve všech oblastech lidské činnosti. Zvuk se tak stal běžnou součástí každodenního života, že si moderní člověk sotva uvědomuje jeho funkce a příčiny. Většina zvuků, které dnes slyšíme, jsou nežádoucí akustické signály nazývané hlukem. Proto se mnoho odborníků zabývá otázkou pohlcování zvuku.

Výrobci automobilů použitím účinných zvukově-pohltivých materiálů redukuje nechtěný hluk ve vozidle (vibrace, hluk motoru, různé příslušenství ke zlepšení funkce vozidla, ...). Každé vozidlo spotřebuje asi 20 m<sup>2</sup> netkaných textilií. Většina těchto materiálů je vyrobená ze syntetických vláken, která nejsou schopná rozkladu a končí na skládkách odpadů. Celosvětovým zájmem o ochranu životního prostředí začal výzkum netkaných textilií, které jsou schopné rozkladu. Cílem výrobců je produkovat vozidla s nejvyšší možnou absorpcí zvuku a nejnižší plošnou hmotností netkaných textilií [53].

Velikým přínosem bylo objevení průmyslového způsobu výroby nanovláknenných vrstev. Porézní materiál pohlcuje zvuk hlavně při vyšších frekvencích, ale nanovláknenná vrstva pohlte zvuk při nízkých a současně neztrácí schopnost pohlcovat při vyšších zvukových frekvencích. Plní tak funkci membrány, která rezonuje na nízké frekvenci (dáno nanorozměry mezivláknenných prostor). Porézní vláknenný materiál působí jako tlumič rezonátoru (přeměňuje zvukovou energii v teplo). Položením jednotlivých rezonančních prvků na sebe (sdružením) vznikne jeden rezonanční systém. Těchto vlastností se využívá i při výrobě zvukově pohltivých obkladů a komponent pro automobilový průmysl [1].

Cílem této práce je nahradit drahá primární vlákna druhotnými surovinami, které budou splňovaly požadavky automobilového průmyslu. Dále se zabývá vlivem tloušťky a počtu nanovláknenných vrstev na hodnotu činitele zvukové pohltivosti.

Teoretická část popisuje rozdělení akustiky, základní veličiny a fyzikální děje spojené s šířením zvuku jako mechanického vlnění. Dále se zabývá různými principy pohlcování zvuku, činitelem zvukové pohltivosti a metodami jeho měření. V další části je uvedena výroba netkaných textilií a shromážděny studie, rovnice a modely související s danou problematikou.

Experimentální část zkoumá vliv složení vzorku netkané textilie na zvukově pohltivé vlastnosti. Jedna vláknenná pavučina je vyrobena z polyesteru a druhá z

---

druhotných surovin, obě s příměsí bikomponentních vláken. Pavučiny jsou odvíjeny v požadovaném počtu vrstev (10, 15 a 20). Na zbytek pavučin je nanесena nanovlákněná vrstva a jsou odvíjeny v tom samém počtu vrstev. Následně se vlákněné vrstvy stlačují na požadovanou tloušťku (10, 15 a 25 mm). Vzorky jsou proměřovány pomocí impedanční trubice.

Výsledky jsou vyhodnoceny a posuzuje se vliv druhu vlákněného materiálu, tloušťky vzorku a počtu nanovlákněných vrstev na činitel zvukové pohltivosti.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Teorie zvuku

**Zvukem** nazýváme každé mechanické vlnění v látkovém prostředí, které je schopno vyvolat v lidském uchu sluchový vjem. Frekvence zvuku leží přibližně v intervalu 20 Hz až 20 000 Hz (20 kHz). Mechanické vlnění s frekvencí menší než 20 kHz je **infrazvuk** (lidské tělo tyto nízké frekvence vnímá hmatem – jsou schopny rozvibrovat celý povrch těla i bránici), jestliže frekvence přesahuje 20 kHz, nazývá se **ultrazvuk** (zvuky nad slyšitelnou hranicí).

Fyzikálními ději, které jsou spojeny se vznikem zvukového vlnění, jeho šířením a vnímáním zvuku sluchem se zabývá **akustika** [2].

#### 2.1.1 Rozdělení akustiky

Důvody a cíle zájmu o akustiku jsou různé, a právě podle toho se dá tento obor rozdělit na několik částí:

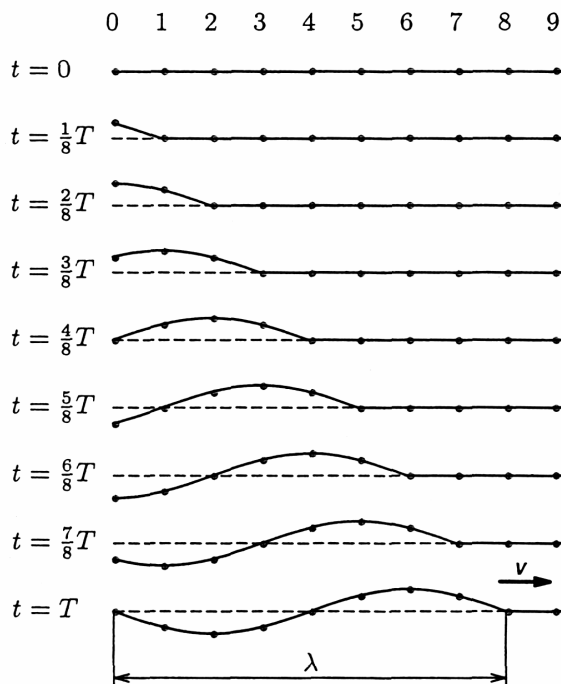
- **Fyzikální akustika** se zabývá fyzikálními vlastnostmi a zákony zvukového vlnění (odraz a pohlcování v různých materiálech).
- **Fyziologická akustika** zkoumá zvukové procesy ve sluchovém a hlasovém orgánu.
- **Hudební akustika** – aplikace poznatků akustiky v hudbě a při studiu vlastností hudebních nástrojů.
- **Prostorová akustika** se zabývá šířením zvuku v prostoru.
- **Stavební akustika** se zabývá způsoby zvukové izolace budov a stavebních konstrukcí.
- **Elektroakustika** se zabývá záznamem, reprodukcí a šířením zvuku s využitím elektrického proudu [3].

### 2.1.2 Zvuk jako mechanické vlnění

Vlnění je jedním z nejrozšířenějších fyzikálních jevů. Mechanické vlnění je děj, při němž se kmitání šíří látkovým prostředím. Šíření vln není spojeno s přenosem látky, ale vlněním se přenáší energie.

Mechanické vlnění vzniká v látkách všech skupenství a jeho příčinou je existence vazebných sil mezi částicemi (atomy, molekulami) prostředí, kterým se vlnění šíří. Kmitání jedné částice se vzájemnou vazbou přenáší na další částici. Současně se tak na tuto částici přenáší energie kmitavého pohybu. Takové prostředí se označuje jako **pružné prostředí** [2].

Přenosem kmitání mezi částicemi pružného prostředí se vytváří vlna. Jestliže hmotný bod, který je zdrojem vlnění, kmitá harmonicky, vzniká mechanická vlna sinusového průběhu.



**Obr. 1:** Postupné vlnění v řadě bodů, čerpáno z [2].

Platí zde vztah

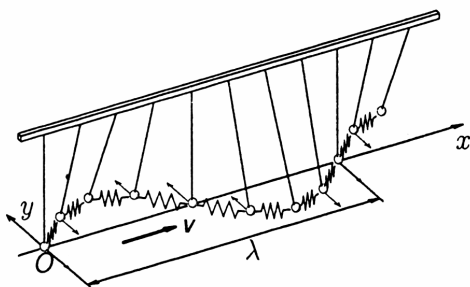
$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \quad (1)$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka [m],  $c$  rychlost postupného vlnění [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $T$  perioda kmitání [s] a  $f$  frekvence kmitání [Hz] (kmitočty) vyjadřující počet změn za jednotku času ( $\text{Hz} = 1/\text{s}$ ).

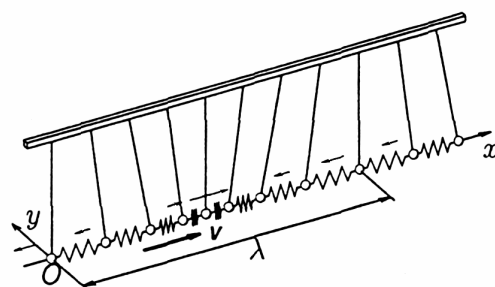
Rozlišujeme dva základní typy postupného mechanického vlnění (obr. 1).

1. **Postupné vlnění příčné** – hmotné body pružného prostředí kmitají kolmo na směr, kterým vlnění postupuje. Je charakteristické pro pružná pevná tělesa ve tvaru tyčí, vláken a pozorujeme ho také na vodní hladině (viz obr. 2).

**2. Postupné vlnění podélné** – částice pružného prostředí kmitají ve směru, kterým vlnění postupuje. Vzniká v tělesech všech skupenství, tedy i v kapalinách a plynech, která jsou při změně objemu (tzn. při stlačování a rozpínání). Postupným vlněním podélným se v pružných látkách šíří zvuk (viz obr. 3).



**Obr. 2:** Postupné vlnění příčné, čerpáno z [2].



**Obr. 3:** Postupné vlnění podélné, čerpáno z [2].

### Interference vlnění

Jestliže se pružným prostředím šíří vlnění ze dvou nebo více zdrojů, jednotlivá vlnění postupují prostředím nezávisle. Avšak v místech, kde se vlnění setkávají, dochází k jejich skládání nebo-li interferenci. Interferencí dvou stejných vlnění vzniká výsledné vlnění, jehož amplituda je největší v místech, v nichž se vlnění setkávají se stejnou fází, a nejmenší (popř. nulová) je v místech, v nichž se vlnění setkávají s opačnou fází.

### Odraz a lom vlnění

Jestliže vlnění dospěje k rozměrné překážce, popř. na rozhraní mezi dvěma prostředími, v nichž se vlnění šíří různou rychlostí, pak se od překážky vlnění odráží, nebo rozhraním dvou prostředí prochází. Na překážce nastává odraz a lom vlnění [2].

### 2.1.3 Základní veličiny a pojmy akustiky

**Vlnová délka** -  $\lambda$  [m] je vzdálenost dvou nejbližších bodů, které kmitají se stejnou fází. Je dána vztahem (1) [2].

**Rychlost šíření zvuku** -  $c$  [m.s<sup>-1</sup>] je nejdůležitější charakteristikou prostředí z hlediska šíření zvuku. Vyjadřuje, za jak dlouho překoná v daném materiálu zvuková

vlna vzdálenost 1 m ve směru svého šíření. Rychlost šíření zvuku je vektor a nemá charakter vlnění. V kapalinách a pevných látkách je rychlost šíření zvuku větší než ve vzduchu. Při teplotě vzduchu 20°C a tlaku 1016 hPa je rychlost zvuku 344 m.s<sup>-1</sup>.

**Akustický tlak** –  $p$  [Pa] je projev akustické energie v místě působení, tzn. kde je akustický tlak odlišný od klidové hodnoty barometrického tlaku. Akustický tlak: je skalár, má charakter vlnění a je nejdůležitější veličinou (přístroje na snímání akustického tlaku mají jednodušší princip než na snímání akustické rychlosti). Barometrický tlak nabývá hodnot kolem 10<sup>5</sup> Pa, akustický tlak se pohybuje v rozmezí 2·10<sup>-5</sup> - 2·10<sup>-2</sup> Pa (pro frekvenci 1 kHz).

**Akustická rychlost** –  $\vec{u}$  [m.s<sup>-1</sup>] je rychlost, se kterou se částice prostředí pohybují vlivem akustického tlaku kolem své rovnovážné polohy. Akustická rychlost: je vektor, fyzikálně rovnocenná akustickému tlaku, má charakter vlnění a je měřitelná, ale principy jejího měření se pro značnou složitost nepoužívají. Akustická rychlost nabývá v pásmu mezi prahem slyšitelnosti a prahem bolestivosti zhruba hodnot 5·10<sup>-8</sup> – 1,6·10<sup>-1</sup> m.s<sup>-1</sup>.

**Intenzita zvuku** –  $\vec{I}$  [W.m<sup>-2</sup>] je měřítkem akustické energie procházející jednotkovou plochou kolmou ke směru šíření zvukové vlny. Intenzita zvuku je dána vztahem:

$$\vec{I} = p \cdot \vec{u} . \quad (2)$$

Intenzita zvuku je vektorová veličina, má charakter vlnění a pohybuje se v rozmezí 10<sup>-12</sup> – 10<sup>3</sup> W.m<sup>-2</sup>.

**Akustický výkon** –  $W$  [W] je měřítkem celkové zvukové energie procházející plochou. Je integrálem skalárního součinu:

$$W = \int_{(S)} \vec{I} \cdot \vec{dS} . \quad (3)$$

Akustický výkon (vztah intenzity zvuku a měřicí plochy) je skalární veličina a má charakter vlnění.

### Hlady akustických veličin

Rozmezí velikosti akustického tlaku, které je lidský sluch schopen registrovat je dáno prahem slyšitelnosti a prahem bolestivosti. **Práh slyšitelnosti** je minimální akustický tlak (jeho efektivní hodnota), který je lidské ucho schopno zaznamenat. Pro

frekvenci 1 kHz je jeho hodnota  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa. **Práh bolestivosti** je taková hodnota akustického tlaku (jeho efektivní hodnoty), která vyvolá trvalé poškození sluchového orgánu. Pro frekvenci 1 kHz je jeho hodnota zhruba  $2 \cdot 10^2$  Pa. Takto definované hranice nejsou konstantní, jejich průběh závisí na frekvenci zvukové vlny.

**Hladina intenzity zvuku** -  $L_I$  [dB] je dána vztahem

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad [\text{dB}] \quad (4)$$

kde  $I_0$  je prahová hodnota intenzity zvuku ( $I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$  při frekvenci 1 kHz).

**Hladina akustického výkonu** -  $L_W$  [dB] je definovaná vztahem

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad [\text{dB}] \quad (5)$$

kde  $W_0$  je prahová hodnota akustického výkonu ( $W_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$  při frekvenci 1 kHz).

**Hladina akustického tlaku** -  $L_p$  [dB] patří mezi nejdůležitější a je dána vztahem

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad [\text{dB}] \quad (6)$$

kde  $p_0$  je prahová hodnota akustického tlaku ( $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa při frekvenci 1 kHz).

**Hladina akustické rychlosti** -  $L_u$  [dB] je definovaná tímto vztahem

$$L_u = 20 \log \frac{u}{u_0} \quad [\text{dB}] \quad (7)$$

kde  $u_0$  je prahová hodnota akustické rychlosti ( $u_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$  při frekvenci 1 kHz).

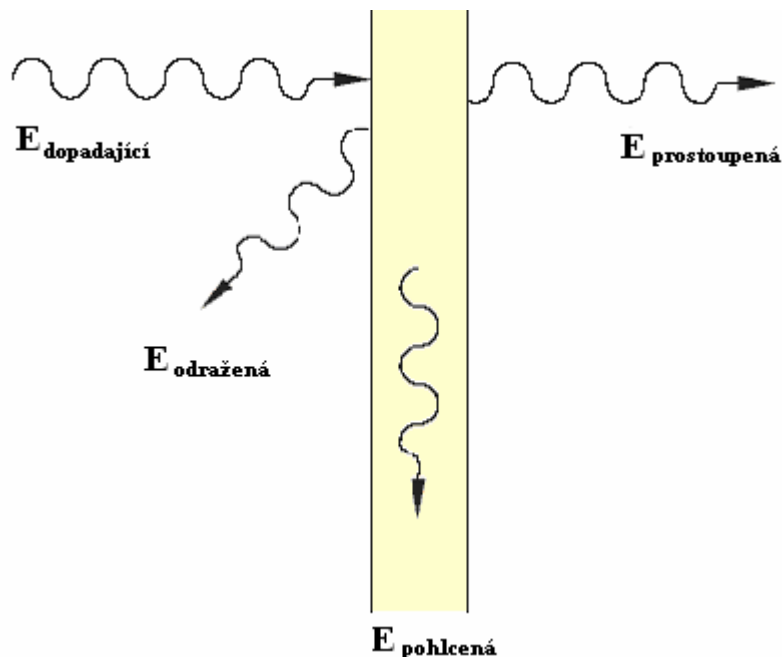
Předchozí odstavce čerpány z [4].

Zvuk dále charakterizují tři základní veličiny. Jsou to: výška, barva a hlasitost zvuku. **Výška zvuku** je určena jeho frekvencí. Čím větší frekvence tím větší tón. **Barvu zvuku** ovlivňuje průběh kmitání. **Hlasitost zvuku** vyjadřuje, jak silně působí zvuk na normální sluch. Závisí na intenzitě zvuku, ale i na citlivosti sluchu na zvuky různé frekvence [3].



### 2.1.4 Činitel zvukové pohltivosti

Schopnost nějakého tělesa pohlcovat zvuk charakterizujeme hodnotou činitele zvukové pohltivosti  $\alpha$ . Činitel zvukové pohltivosti je bezrozměrné číslo, jehož velikost se může pohybovat v intervalu od 0 do 1. Stěna pohlcující zvuk úplně, má činitel zvukové pohltivosti 1, zatím co stěna, dokonale odražející zvuk má tento činitel roven 0 [8].



**Obr. 4:** Schéma akustické energie při dopadu zvukové vlny na překážku, čerpáno z [5].

Abychom mohli lépe sledovat vlastnosti pohltivých látek, je nutné se zmínit o veličinách, které tyto vlastnosti charakterizují. Při každém odrazu zvuku na rozhraní vzduch – pevná látka dojde k tomu, že část zvukové energie se odrazí zpět, část pohltí pevná látka a část se vrací zpět do prostoru.

Činitel zvukové pohltivosti (absorpce)  $\alpha$  [-] je definován jako poměr energie pohlcené určitou plochou, k energii, která na tuto plochu dopadá

$$\alpha = \frac{E_{\text{pohlčená}}}{E_{\text{dopadající}}} \quad (8)$$

Činitel zvukové odrazivosti (reflexe)  $\beta$  [-] je určen poměrem energie odražené k energii, která na tuto plochu dopadá

$$\beta = \frac{E_{\text{odražená}}}{E_{\text{dopadající}}} . \quad (9)$$

Činitel zvukové průzvučnosti  $\tau$  [-] je definován poměrem energie prošlé do vedlejší místnosti k celkové dopadající energii

$$\tau = \frac{E_{\text{prostoupená}}}{E_{\text{dopadající}}} . \quad (10)$$

Předchozí odstavce čerpány z [6, 7].

Toto rozdělení dopadající akustické energie na jednotlivé složky vyhovuje v oblasti prostorové akustiky. Vzhledem k zákonu zachování energie musí platit:  $\alpha + \beta + \tau = 1$  [8].

U pohltivosti závisí velikost  $\alpha$  na materiálu a charakteru povrchu. Větší činitel pohltivosti mají materiály pórovité (koberce, závěsy, děrované panely apod.), velmi malý činitel  $\alpha$  mají materiály kompaktní a hladké (kov, dlaždice, sklo apod.).

Chceme-li snížit hladinu zvukové energie v prostoru, zvyšujeme celkovou pohltivost zvuku. To lze buď obkládáním hmotami s velkým činitelem  $\alpha$ , nebo speciálními pohlcujícími konstrukcemi [7].

## 2.2 Mechanika pohlcování zvuku

Bližší poznání mechanismu pohlcování je důležité jak pro výrobce pohltivých látek, kterému dává podklady pro jejich vývoj a konstrukci, tak i pro spotřebitele, který může lépe řídit výběr látek dle svých potřeb. Získává tím představu o možnostech modifikace vlastností pohltivých látek a hlavně pak při jejich aplikacích může s nimi nakládat tak, aby potřebných akustických vlastností bylo dosaženo.

Akustické obklady pro pohlcování zvuku nelze zaměňovat s materiály pro zlepšení zvukové izolace stavebních a jiných konstrukcí, neboť pohltivé akustické obklady mají velmi nízký stupeň vzduchové neprůzvučnosti. Z hlediska pohlcování zvuku můžeme obklady rozdělit do tří skupin:

- obklady tvořené porézními materiály
- obklady založené na principu rezonance
- složené pohltivé konstrukce

Pod pojmem pohlcování zvuku máme z hlediska fyzikálního na mysli přeměnu zvukové energie v energii jinou, obvykle tepelnou. Z tohoto hlediska můžeme principy přeměny zvukové energie při šíření v pevných látkách rozdělit na tři skupiny:

- přeměny vznikající třením,
- přeměny vznikající poklesem akustického tlaku, tj. změnami relaxačními,
- přeměny vznikající nepružnou deformací těles.

K přeměně akustické energie vlivem tření dochází tehdy, pohybuje-li se vzduch v blízkosti pevné stěny. Aby bylo přeměněno dostatečné množství energie, musí plocha, na níž nastává tření, být značně veliká. Proto se k pohlcování zvuku tímto způsobem dobře hodí látky porézní, u nichž se zvuk šíří v látce jemnými póry, jejichž celková plocha je značně veliká vzhledem k jejímu objemu. K viskózním ztrátám akustické energie dochází všeobecně na stěnách otvorů, pórů, na povrchu kanálků nebo vláken.

Přeměna zvukové energie, označená jako relaxační, vzniká následkem zmenšení akustického tlaku. Látkou se šíří zvukové vlnění. V místech, kde dochází ke zhušťování částic, akustický tlak nabývá kladných hodnot (stoupá). Pokud dojde k relaxaci (zmenšení) akustického tlaku, zmenší se potenciální energie a tím i energie zvukové vlny.

K přeměnám zvukové energie vlivem nepružné deformace těles dochází u látek, které vykazují tzv. pružnou hysterezi. Stlačíme-li takovou látku určitou silou, nevrátí se tato látka do původního stavu, přestane-li síla působit. Práce vynaložená na deformaci je tedy větší než práce získaná pružností tělesa zpět při návratu do původního tvaru a jejich rozdíl představuje úbytek zvukové energie vlivem nedokonalé pružnosti [6, 8].

### 2.2.1 Porézní materiály

Porézní materiál je obvykle pevná látka, v jejímž objemu se nacházejí malé dutinky vyplněné vzduchem. Poměr objemu těchto dutinek k celkovému objemu látky

je dosti značný a činí asi 60 až 95% celkového objemu. Materiál, tvořící kostru látky je buď vláknitý, nebo má strukturu ztuhlé pěny. Má-li materiál dobře pohlcovat zvuk, musí být jeho póry navzájem spojeny, aby se zvuk mohl šířit dále, respektive, aby mohl vzduch při akustickém kmitání proudit. Jedině tak bude možno využít přeměny akustické energie vlivem tření. Póry nemusí být spojeny u materiálů, jejichž kostra je velmi poddajná, elastická, takže zvuk do ní snadno z pórů přechází.

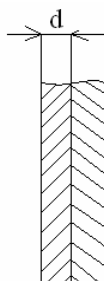
Porézní materiály dělíme na vláknité, kanálkovité a pěněné. Dále se dělí podle materiálu na organické, minerální, skleněné a z plastických hmot.

Při upevnění porézních pohltivých materiálů mohou nastat dva případy:

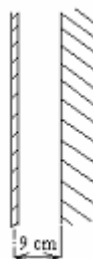
- a) materiál je upevněn na pevné akusticky tvrdé stěně (viz obr. 5),
- b) mezi látkou a stěnou se nachází vzduchový polštář (viz obr. 6).

V prvním případě platí, že čím je materiál tlustší, tím vyšší má činitel zvukové pohltivosti v oblasti nízkých kmitočtů. To je způsobeno velikostí pohybové energie přeměňované v teplo a závisějící na amplitudě akustické rychlosti.

Obdobného účinku jako v prvním případě dosáhneme, vytvoříme-li za porézní vrstvou uzavřený vzduchový polštář. V praxi se z ekonomických důvodů často používá toto uspořádání.



**Obr. 5:** Porézní materiál umístěný přímo na stěně, čerpáno z [6].



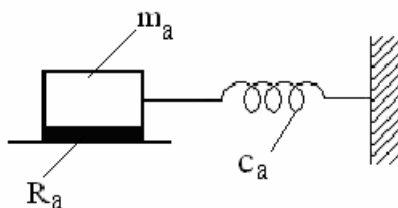
**Obr. 6:** Porézní materiál umístěný před pevnou stěnou ve vzdálenosti  $d$ , čerpáno z [6].

Porézní materiály se jen zřídka používají samotné pro jejich nevýhodný povrch. Jsou však nedílnou součástí většiny akustických obkladů [6, 8].

### 2.2.2 Obklady založené na rezonančním principu

Obklady můžeme rozdělit do tří skupin:

- uspořádání chovající se jako kmitající membrány,
- uspořádání chovající se jako kmitající desky,
- upořádání spočívající na principu Helmholtzových rezonátorů.



**Obr. 7:** Schématické znázornění kmitající akustické soustavy, čerpáno z [6].

Na obr. 7 je schématicky znázorněna akustická rezonanční soustava, která se skládá z akustické hmotnosti  $m_a$ , připojené na akustickou poddajnost  $c_a$ , jejíž pohyb je tlumen akustickým odporem  $R_a$ . Dopadne-li na rezonanční soustavu zvukové vlnění, uvede ji do vynucených kmitů, jejichž amplituda je maximální v případě rezonance. Přestane-li dopadat vlnění na soustavu, bude ještě po jistou dobu dokmitávat na vlastním (rezonančním) kmitočtu. Tomuto jevu říkáme **doznívání**. Doba, po kterou takový rezonátor doznívá, se nazývá doba doznívání, a je závislá na tlumení rezonátoru. Má-li rezonanční soustava sloužit k účinnému pohlcování zvuku, musí být dostatečně tlumena, aby co největší množství zvukové energie, nashromážděné v rezonátoru, bylo přeměněno v teplo [6, 8].

#### Kmitající membrány

Kmitající membrána je tenká deska nebo fólie, jejíž tuhost v ohybu je nepatrná a která je upevněna na rámu v určité vzdálenosti od pevné stěny. Chování takové membrány můžeme v prvním přiblížení přirovnat ke kmitající soustavě viz schéma na obr. 7.

Membrána představuje hmotnost  $m$ . Vzduchový polštář vytváří pružinu, jejíž poddajnost je  $c$ . Prostor mezi membránou a zadní pevnou stěnou bývá vyplněn

porézním materiálem, který tlumí kmitání částic vzduchu v tomto prostoru a tím i celou soustavu. Obvykle se volí membrána s menší ohybovou tuhostí než má vzduchový polštář.

Rezonanční kmitočet  $f_r$  kmitající membrány se stanoví ze vztahu

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho S}{md}} \quad [\text{Hz}] \quad (11)$$

kde  $\rho$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] je hustota vzduchu,  $S$  [ $\text{m}^2$ ] plocha membrány,  $m$  [ $\text{kg}$ ] hmotnost membrány a  $d$  [ $\text{m}$ ] tloušťka vzduchového polštáře.

Při rezonančním kmitočtu dochází k maximálnímu pohlcování akustické energie. Pokud se do vzduchového polštáře vloží porézní materiál s odstupem 0,5 až 1 cm za membránou, tak se dosáhne vyšších hodnot činitele zvukové pohltivosti [6, 8].

### **Kmitající desky**

Kmitající deska je tuhá deska, velmi měkce upevněná na okraji, která kmitá jako píst. Kmitající desky se od membrán liší především svou tuhostí v ohybu, která obvykle tuhost polštáře značně převyšuje. U desek se kromě základních (pístových) kmitů uplatňují i kmitů vyšších řádů (ohybové kmitů).

Vlastní kmitočty obdélníkové desky  $f_{p,q}$  o rozměrech  $a$  [ $\text{m}$ ] x  $b$  [ $\text{m}$ ] a tloušťce  $h$  [ $\text{m}$ ], která je upevněna na svém okraji (nikoli vetknuta), jsou dány

$$f_{p,q} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho c^2}{Md} + \frac{4\pi^2}{M} \left[ \left( \frac{p}{a} \right)^2 + \left( \frac{q}{b} \right)^2 \right]^2 \frac{Eh^3}{12(1-\sigma^2)}} \quad [\text{Hz}] \quad (12)$$

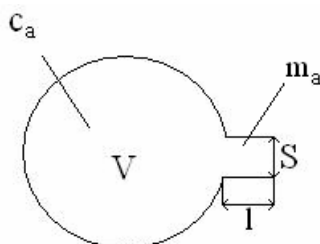
kde  $M$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ] je plošná hmotnost desky,  $E$  [ $\text{Pa}$ ] modul pružnosti desky,  $d$  [ $\text{m}$ ] vzdálenost desky od pevné stěny,  $\sigma$  [-] Poissonova elastická konstanta a  $p, q$  jsou módová čísla příslušného vlastního kmitu.

Potřebné tlumení kmitajících desek se dosáhne obvykle vyplněním dutiny mezi deskou a stěnou vhodným porézním materiálem. Maximum v kmitočtovém průběhu činitele zvukové pohltivosti je obvykle v oblasti nízkých kmitočtů.

### Helmholtzovy rezonátory a děrované desky

Druhý typ rezonančních soustav, používaných k pohlcování zvuku, jsou rezonátory Helmholtzova typu, uspořádané buď jednotlivě, nebo sdružené do tzv. děrovaných desek.

Helmholtzův rezonátor je tvořen dutinou o určitém objemu  $V$ , opatřenou hrdlem o délce  $l$  a průřezu  $S$ , v níž se nachází určitá hmota vzduchu. Objem rezonátoru se chová jako poddajnost  $c_a$ , píst reprezentuje akustickou hmotnost  $m_a$ . Pohybu pístu (akustické hmotě) je kladen určitý odpor, který má velikost  $R_a$ .



**Obr. 8:** Schéma Helmholtzova rezonátoru, čerpáno z [6].

Jednotlivě rozmístěné rezonátory v prostoru se používají v praxi velmi zřídka. Často jsou používány tzv. děrované panely, které jsou tvořeny tuhou deskou umístěnou v určité vzdálenosti od stěny a opatřenou kruhovými nebo kuželovými otvory, případně drážkami. Deska je umístěna ve vzdálenost  $d$  od pevné stěny, takže ke každému otvoru přísluší určitá dutina, která tvoří s otvorem Helmholtzův rezonátor. Přitom dutina reprezentuje akustickou poddajnost a otvor akustickou hmotu.

Rezonanční kmitočet takové soustavy je dán vztahem

$$f_r = \frac{c}{4\pi} \sqrt{\frac{S_1}{l'dS_2}} \quad [\text{Hz}] \quad (13)$$

kde  $S_1 [\text{m}^2]$  plocha otvoru v desce,  $l'$  [m] korigovaná tloušťka desky,  $d$  [m] vzdálenost od pevné stěny (tloušťka vzduchového polštáře) a  $S_2 [\text{m}^2]$  plocha stěny připadající na jeden rezonátor [6].

Závislost činitele pohltivosti na kmitočtu má maximum na rezonančním kmitočtu soustavy. Průběh pohltivosti je také závislý na velikosti tlumení, které se zajišťuje obvykle vkládáním porézních materiálů do dutiny rezonátoru.

## 2.3 Metody měření činitele zvukové pohltivosti

Existuje několik metod pro zjišťování činitele zvukové pohltivosti  $\alpha$  např. dozvuková místnost, měření měrného stejnosměrného odporu, metoda odražené vlny a měření na impedanční trubici.

- **Dozvuková místnost** – patří mezi nepřímé měřicí metody. Princip spočívá v měření dozvuku prázdné místnosti a místnosti s vloženým vzorkem měřeného obkladu. Z rozdílných naměřených dob dozvuku se vypočítá činitel zvukové pohltivosti. Při měření musí být splněna podmínka rovnoměrného úhlového rozložení zvukových vln (všesměrový dopad zvuku). Metoda má mnoho nevýhod např. je potřeba velká místnost s nerovnoměrnými stěnami a hodně vzorků velkých rozměrů.
- **Měření měrného stejnosměrného odporu** – provádí se pouze u porézních materiálů a proto je tato metoda málo účelná. Patří mezi nepřímé metody měření [8].
- **Metoda odražené vlny** – umožňuje stanovit činitel zvukové pohltivosti materiálu pro různé úhly dopadu zvukové energie. Výhodou je všesměrový dopad zvuku a potřeba vzorků malých rozměrů. Nevýhodou je, že se musí zamezit snímání přímého neodraženého zvuku a použít dokonale odrazivou podložku s nulovou zvukovou pohltivostí [9].
- **Měření na impedanční trubici** - touto metodou se dají proměřovat vzorky malých rozměrů s velkou přesností. Mezi nevýhody patří kolmý dopad zvukových vln na vláknennou vrstvu, který se v praxi vyskytuje jen zřídka [8].

V experimentální části této práce byla použita dvou-mikrofonová impedanční trubice pro měření činitele zvukové pohltivosti vláknenných vrstev.

### 2.3.1 Dvou-mikrofonová impedanční trubice

Dvou-mikrofonová impedanční trubice Brüel & Kjær Type 4206 (obr. 9) se používá pro měření akustických charakteristik (činitel zvukové pohltivosti, činitel zvukové odrazivosti a normovaná impedance) malých testovacích vzorků ve



frekvenčním rozsahu 50 Hz až 6,4 kHz. Podstatou je rozklad širokopásmového stacionárního náhodného signálu (bílý šum) do jeho dopadající a odražené složky. Zvukový signál je vytvářen reproduktorem a rozklad signálu na signál ze zdroje a odražený signál je zjišťován ze závislosti mezi akustickými tlaky, které jsou měřeny dvojicí mikrofونů umístěných ve stěně trubice. Měření touto metodou popisují mezinárodní normy ISO 10534–2 a ASTM E1050–98 [10].

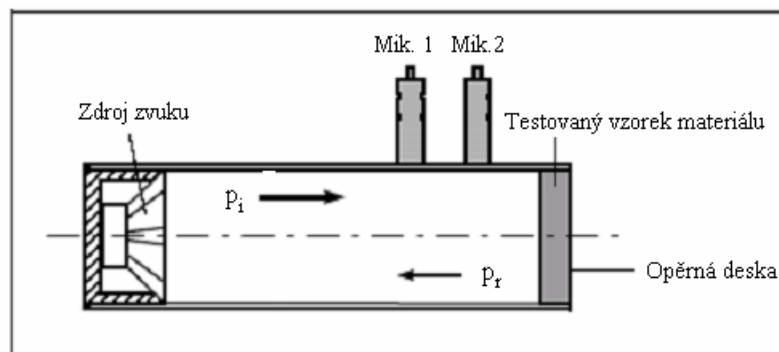
Měřicí soustava se skládá z dvou-mikrofonové impedanční trubice, generátoru zvukového signálu se zesilovačem, analyzátoru zvukového signálu a výpočetní jednotky.

Dvou-mikrofonové měřicí zařízení je vybaveno dvěma trubicemi:

- velká trubice s vnitřním průměrem 100 mm měří na nižších frekvencích (50 Hz - 1,6 kHz)
- malá trubice s vnitřním průměrem 29 mm měří vyšší frekvence (500 Hz – 6,4 kHz).



**Obr. 9:** Dvou-mikrofonová impedanční trubice typ 4206, čerpáno z [11].



**Obr. 10:** Průřez dvou-mikrofonové impedanční trubice ( $p_i$  je dopadající složka a  $p_r$  odražená složka akustického tlaku), čerpáno z [10].

### **Princip měření:**

Zdroj zvuku (reproduktor) je umístěn na jednom konci impedanční trubice a vzorek materiálu je umístěn na konci druhém. Reproduktor vytváří širokopásmové stacionární náhodné zvukové vlny. Tyto rovinné vlny šířící se trubicí narazí na vzorek a pak se odrazí (viz obr. 10).

Dvojice mikrofónů umístěná ve stěně trubice snímá na dvou místech složky dopadajícího  $p_i$  a odraženého  $p_r$  akustického tlaku, pomocí nichž jsou vypočítány tři frekvenční přenosové funkce:  $H_l$  frekvenční přenosová funkce,  $H_i$  frekvenční přenosová funkce spojená se složkou signálu od zdroje,  $H_r$  frekvenční přenosová funkce spojená se složkou odraženého signálu

Využitím těchto přenosových funkcí můžeme provést výpočet komplexního koeficientu odrazivosti ( $R$ ) dle následujícího vztahu:

$$R = \left( \frac{H_l - H_i}{H_r - H_l} \right) e^{j2k(l+s)} \quad (14)$$

kde  $k$  je vlnové číslo,  $l$  [m] je vzdálenost mezi prvním mikrofónem a přední stranou vzorku,  $s$  [m] je vzdálenost mezi měřicími mikrofóny.

Z koeficientu odrazivosti  $R$  lze provést výpočet normalizovaného impedančního poměru ( $z/\rho c$ ) a koeficientu akustické pohltivosti ( $\alpha$ ) dle následujících vzorců:

$$\frac{z}{\rho c} = \frac{1 + R}{1 - R} \quad (15)$$

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (16)$$

Měření akustické pohltivosti dvou mikrofónovou metodou předpokládá šíření rovinných vln a žádné úniky energie způsobené pohltivostí stěn impedanční trubice[10].

## 2.4 Teorie výroby netkaných textilií

### 2.4.1 Technologie výroby netkaných textilií

Netkaná textilie je vrstva vyrobená z jednosměrně nebo náhodně orientovaných vláken, spojených třením a/nebo kohezí a/nebo adhezí s výjimkou papíru a výrobků vyrobených tkaním, pletením, všíváním, proplétáním nebo plstěním [12]. Vláknennou vrstvu je možno kombinovat s plošnými textiliemi (tkaniny, pleteniny) nebo netextilními plošnými útvary (fólie z plastických hmot, z kovů).

Způsob výroby se volí podle zpracovávaného materiálu, požadovaných vlastností a oblasti použití netkané textilie.

V současné době se výroba netkaných textilií neustále zvyšuje. Dochází k výrobě nových typů textilií, novými technologiemi, z nových materiálů, pro běžné, ale i velmi často pro vysoce specializované použití (např. technické textilie, zdravotnictví, osobní použití, letecký, kosmický a automobilový průmysl, filtry ...) [13]. V této práci jsou netkané textilie použity jako zvukově pohltivý materiál.

### 2.4.2 Vlákná pro výrobu netkaných textilií

V této práci bylo využito druhotných surovin a polyesterových vláken v kombinaci s bikomponentními vlákny (typ j/p) pro výrobu netkaných textilií a polymerního roztoku z polyvinylalkoholu k výrobě nanovláknenných vrstev technologií elektrostatického zvlákňování.

### 2.4.2.1 Základní vlákna

Pod pojmem základní vlákna si můžeme představit běžně vyráběné vlákenné suroviny pro textilní průmysl (vlákna přírodní, vlákna z přírodních a syntetických polymerů), zejména ve formě stříží. Dnes však vzrůstá počet vláken, která vznikají v procesu tvorby vlákenné vrstvy přímo z polymeru. Významnou součástí surovinové základny jsou sekundární (druhotné) vlákenné suroviny pocházející z technologických odpadů [12].

#### Polyesterová vlákna

Zaujímají první místo v produkci syntetických vláken. Polyester (PL) je kondenzační produkt s esterovou vazbou  $-\text{CO}-\text{O}-$  v hlavním řetězci.

Do polykondenzační reakce vstupuje obecně diol:  $\text{HO} - (\text{CH}_2)_n - \text{OH}$  a dikyselina:  $\text{HOOC} - \text{R} - \text{COOH}$  [13]. Podle funkčnosti výchozích látek vznikají buď lineární polyestery, které se používají hlavně na výrobu vláken a fólií, nebo rozvětvené, případně zesíťované polymery používané na výrobu laků, zalévacích hmot apod. [15]

Klasický polyester (polyethyltereftalát = PET) se vyrábí polykondenzací kyseliny tereftalové a etylénglykolu při  $270^\circ\text{C}$  -  $290^\circ\text{C}$  ve vakuu. PET lze v poměrně širokých mezích chemicky modifikovat [14].

Základní vlastnosti polyesterů vyplývají z jejich struktury. Polární skupiny  $-\text{CO}-\text{O}$  neobsahují vodík, takže se netvoří mezi molekulami vodíkové můstky. Z toho vyplývá nižší teplota tání ( $256^\circ\text{C}$ ) a větší rozpustnost. [15] Mezi kladné vlastnosti polyesterů patří: dobré mechanické vlastnosti (vysoká pružnost a objemnost), odolnost vůči oděru, termoplasticita, dobrá termická odolnost výrobků ( $200^\circ\text{C}$ ), lépe odolává slunci než PA, rychlé schnutí a snadná údržba. Nevýhodou polyesterů je náročnější barvení, vysoká žmolovitost, nízká navlhavost, nabíjení elektrostatickou elektřinou a vysoká měrná hmotnost [12, 14].

#### Polyvinylalkohol

Polyvinylalkohol (PVA) se průmyslově připravuje hydrolýzou polyvinilacetátu v kyselém nebo alkalickém prostředí. Přímá syntéza z monomeru není možná, protože vinylalkohol není stálý a přechází na stabilnější formu – acetaldehyd.

Podle stupně hydrolýzy lze získat produkty, které obsahují alkoholické skupiny, nebo takové, kde je zachována určitá část acetátových skupin. Stupeň hydrolýzy má vliv na fyzikální vlastnosti polymeru. Lineární makromolekuly s polárními hydroxylovými skupinami jsou navzájem poutány silnými mezimolekulárními vazbami – vodíkovými můstky. Část hmoty je v krystalickém stavu. Tento podíl se zvyšuje se stoupajícím stupněm hydrolýzy. Teplota skelného přechodu  $T_g$  je 73 – 80°C a teplota tání 230 – 250°C.

Polyvinylalkohol je rozpustný ve vodě. Rozpustnost ve vodě lze snížit různými způsoby zesíťování, nejčastěji formaldehydem (acetylace) nebo účinkem kyselin (např. kyselina polyakrylová) [11,12].

### **Textilní druhotné suroviny**

Druhotné suroviny jsou materiály, které nedosáhly nebo ztratily svou užitnou hodnotu a byly vyřazeny z výrobních procesů.

Textilní odpad se dělí na *průmyslový odpad* a *sběrové textilie*. Průmyslové odpady jsou technologické odpady vznikající při výrobě a zpracování textilií, jejichž součástí jsou textilní odstřížky a vlákna v jakékoliv formě. Sběrové textilie jsou především obnošené, poškozené nebo z užívání vyřazené oděvní součásti, bytové textilie, textilie a oděvy. Při operaci třídění dochází k jejich členění na druhotné suroviny [16].

Základní technologické operace jsou: třídění (párání, odstranění tvrdých částí); praní, odbarvování, karbonizace + vyklepávání; sekání; špikování; trhání; zpracování trhaniny pomocí klasických přádelnických postupů nebo postupy výroby netkaných textilií [17].

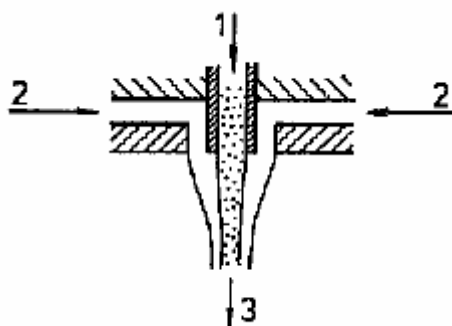
Nejvíce se druhotné suroviny zpracovávají netkanými technologiemi a používají se v technických oblastech, kde se většinou nekladou zvláštní nároky na barvu a povrchový vzhled. Netkané textilie se nejčastěji zpevňují tepelným a chemickým pojením, proplétáním, vpichováním, plstěním a v automobilovém průmyslu se často používá laminace. Nachází uplatnění hlavně jako zvukově a tepelně izolační materiály ve stavebnictví, zvukově izolační a vycpávkový materiál při stavbě vozidel, letadel, lodí atd. [16]

### 2.4.2.2 Speciální vlákna

Speciální vlákna jsou vlákna, která se při výrobě zvlášť upravují např. speciální úpravou povrchu nebo intenzivnějším tvarováním (docílí se vyšší objemnosti výrobků).

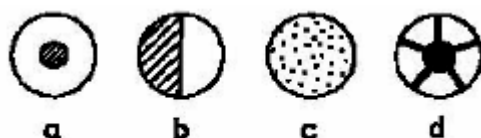
#### Bikomponentní vlákna

Vyrábějí se zvlákňováním nejčastěji dvou různých polymerů pomocí zvláštní zvlákňovací hubice (viz obr. 11, 12).



**Obr. 11:** Průřez zvlákňovací hubice pro výrobu bikomp. vláken typu jádro-plášť [12].

1, 2 – přívod jednoho a druhého polymeru; 3 – vznikající bikomponentní vlákno



**Obr. 12:** Typické tvary příčných řezů bikomponentních vláken [12].

Vlákna jádro-plášť a bok po boku (viz obr. 12 a, b) se využívají jako pojiva při výrobě pojených textilií. Skládají se obvykle z výše a níže tající polymerní složky. Nejčastěji je ve funkci výše tající složky polyester a níže tající složky kopolyester. Bikomponentní vlákna se aplikují do směsi se základními vlákny nebo samotná.

V průběhu pojení se vlákno díky výše tající složce nezbortí a výrobky mají vyšší objemnost. Adhezní (bodové) spoje se vytvářejí v místech křížení vláken. Větší část vláken tvoří poměrně pohyblivé úseky mezi spoji. To vede k výrobkům s dobrou ohebností a nízkým počátečním modulem v tahu [12].

### 2.4.2.3 Nanovláknna

Přesná definice nanovláken neexistuje. Obecně jsou popisována jako vlákna, jejichž průměr se pohybuje v submikronové oblasti, tedy v rozsahu do 1000 nm. Vyznačují se několika výjimečnými vlastnostmi jako je velký měrný povrch (poměr povrchu vláken k jejich hmotnosti), velká pórovitost vlákenné vrstvy a malý rozměr pórů. Tyto vlastnosti předurčují polymerní nanovláknna pro použití v mnoha důležitých aplikacích. Ke zvlákňování se používá více než 50 druhů polymerů. Nanovláknna patří mezi materiály budoucnosti.

#### Metody výroby nanovláken:

- **Dloužení** (*drawing*) je proces podobný zvlákňování za sucha ve vlnářském průmyslu. Produkuje velmi dlouhá jednotlivá vlákna.
- **Podložková syntéza** (*template synthesis*) je metoda, která využívá pro tvorbu nanovláken nebo nanotubiček membránu s nanorozměrnými póry z různých materiálů např. elektricky vodivé polymery, kovy a uhlík. Tato metoda neprodukuje jednotlivá vlákna.
- **Fázová separace** (*phase separation*) se skládá z rozpouštění, želatinace, extrakce (za použití různých rozpouštědel), mrazení a sušení. Výsledkem časově náročného procesu je nanorozměrná pórovitá pěna.
- **Samo-organizování** (*self assembly*) je časově náročný proces, ve kterém se jednotlivé prvotní složky organizují do požadovaných vzorů a funkcí.
- **Elektrostatické zvlákňování** (*electrospinning*) je způsob přípravy ultra jemných vláken z polymerního roztoku nebo taveniny pomocí elektrostatických sil [18].

V kapitole 2.4.5 je o elektrostatickém zvlákňování zmíněno více, protože nanovláknenná vrstva se v rámci experimentu vyráběla tímto způsobem.

### 2.4.3 Elektrostatické zvlákňování

Tato metoda je známá od roku 1934, kdy byl publikován první patent [19]. Technologie je založena na formování taveniny polymeru ve vlákna působením silného

elektrostatického pole. Vzniklá vlákna jsou současně vlivem pole ukládána na podložku, nejčastěji textilní materiál, pohybující se po povrchu opačné elektrody.

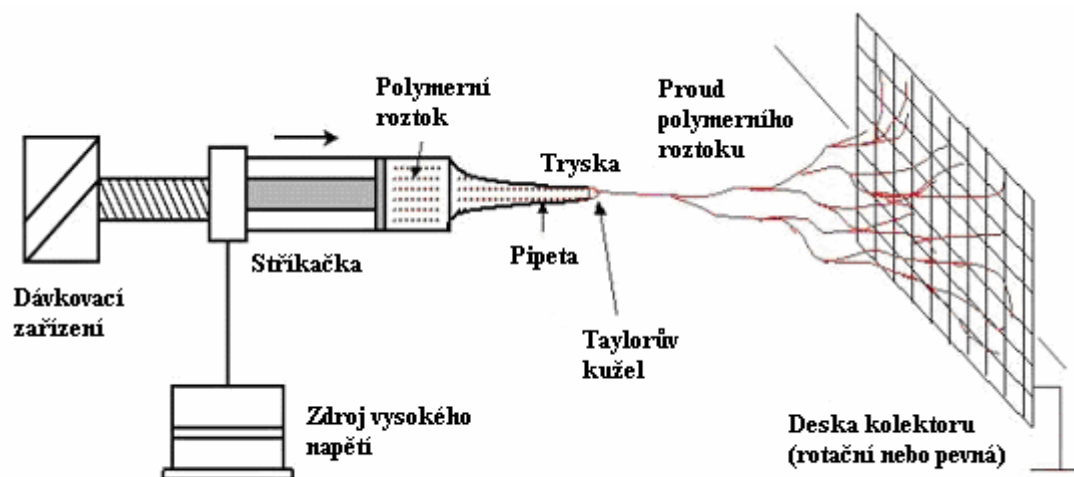
Technologií elektrostatického zvlákňování lze zpracovávat prakticky všechny tavitelné polymery.

Stálý výzkum v oblasti elektrostatického zvlákňování vede k tomu, že jsou modifikována různá výrobní zařízení. Na obr. 17 je zařízení, které má horizontálně umístěnou kapiláru a pro uvedení kapky do procesu je užito čerpadlo. Některé typy využívají vertikální kapiláru, z které kapalina odkapává vlivem gravitace a vlákna se ukládají na kolektor umístěný pod kapilárou. Někdy může být kapilára nakloněna v definovaném úhlu pro kontrolu toku. V různých variantách se může použít uzemněný kolektor. Obvykle to je rovná kovová deska nebo mřížka, která může být pokryta textilií. Takto připravená nanovlákna se vyskytují převážně ve formě vlákenné vrstvy, která může být výhodná jen pro malý počet aplikací. Existuje několik technologických úprav, které se pokouší získat jednotlivá vlákna nebo jednoose orientované svazky těchto vláken. Tyto úpravy nejsou zatím moc úspěšné, protože dráha polymerního proudu je velmi komplikovaná [21].

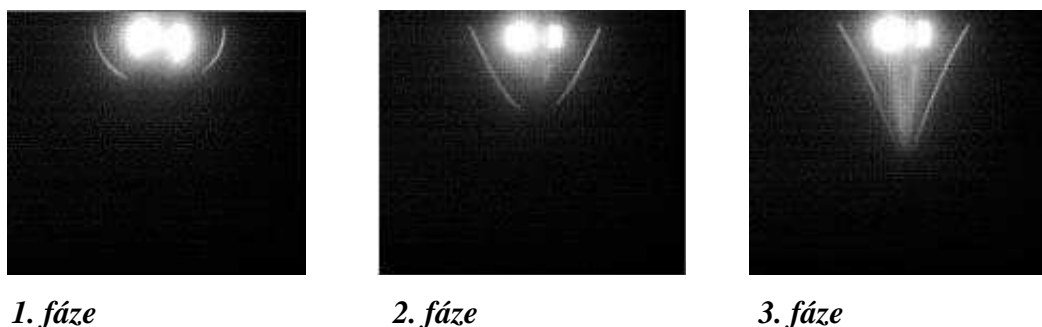
#### **2.4.3.1 Princip elektrostatického zvlákňování**

Při elektrostatickém zvlákňování (obr. 13) je zdroj vysokého napětí přímo spojen s kapilárou, ve které je polymerní roztok nebo tavenina. Následně dojde ke zvlákňování roztoku pomocí kapiláry (trysky). Se zvyšující se intenzitou elektrostatického pole, se hemisférický povrch kapaliny ve špičce kapiláry prodlužuje a vytváří kuželový tvar známý jako tzv. Taylorův kužel (obr. 14). Dalším zvýšením elektrického pole je dosaženo kritické hodnoty, při které odpudivá elektrostatická síla překoná povrchové napětí a ze špičky Taylorova kuželu je vypuzen nabitý proud kapaliny. Vytékající proud polymerního roztoku podstoupí prodlužování, které může a nemusí být doprovázeno větvením výtrysku. Mezitím se odpaří rozpouštědlo a zanechá nabitá polymerní vlákna, která jsou vysoce orientovaná s malým průměrem. Tato vlákna se náhodně ukládají na uzemněný kolektor ve formě netkané textlie.





**Obr. 13:** Schéma elektrostatického zvlákňování – horizontální kapilára, čerpáno z [22].



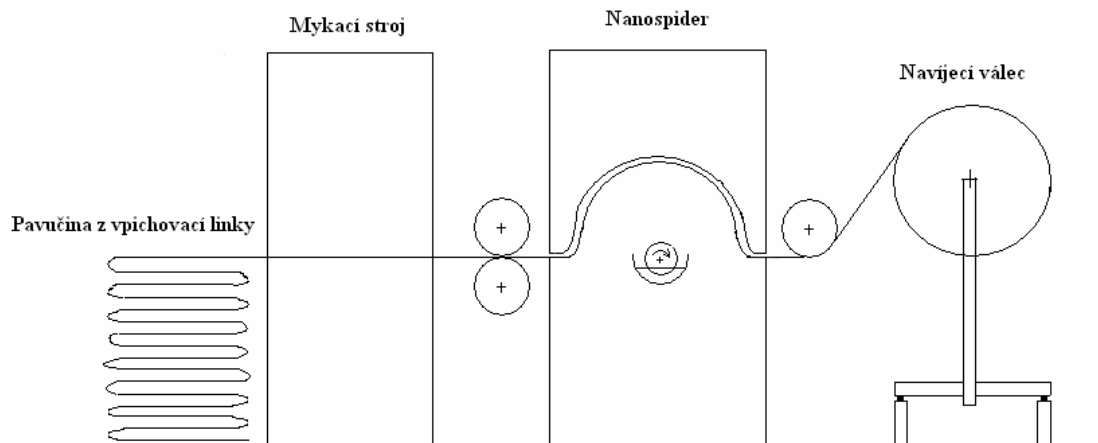
**Obr. 14:** Formování Taylorova kužele. Napětí se v každé fázi zvyšuje. Ve stavu 3 došlo k rovnováze mezi povrchovým napětím a elektrostatickou silou, čerpáno z [23].

Při elektrostatickém zvlákňování taveniny musí být polymer rozehrátý na vysokou teplotu (přes 200°C), která záleží na typu polymeru. Od zvlákňování z roztoku se liší tím, že celý proces probíhá ve vakuu a vytékající proud ztuhne na své dráze od kapiláry ke kolektoru. Vzhledem k vyšší viskozitě taveniny se nedají formovat tak jemná vlákna jako při zvlákňování z roztoku [20].

Vlastnosti vláken závisí na homogenitě pole, viskozitě polymeru, síle elektrického pole a vzdálenosti trysky od kolektoru [19].

### 2.4.3.2 Metoda „Nanospider“

Tento způsob výroby nanovláken byl vyvinut na Katedře netkaných textilií Technické univerzity v Liberci v roce 2004. Zařízení je na obr. 15.



**Obr. 15:** Postup výroby nanovláknenné vrstvy

Kovový válec (nabitá elektroda) se otáčí kolem své osy a je z části ponořen do polymerního roztoku, který ulpívá na jeho povrchu. Při samotném zvlákňování se na povrchu válce tvoří Taylorovy kužele, místa prvního formování nanovláken. Pomocí elektrostatického pole a odsávání jsou nanovláknena směřována k protielektrodě a následně uložena na podkladovou textilií ve formě nanovláknenné vrstvy.

Výhodou této metody je, že k formování vláken nepoužívá žádné trysky a kapiláry. Produkce je podstatně vyšší než u jiných metod [24]. Průměr vláken se pohybuje v rozsahu 100 – 300 nm a plošná hmotnost nanovláknenných vrstev je 0,1 – 5 g.m<sup>-2</sup> na 1m pracovní šíře [25].

## 2.5 Rešerše

Následující studie, modely a experimenty v pracích řady autorů se zabývají zvukově pohltivými vlastnostmi vláknenných materiálů (netkaných, tkaných, porézních ...) a odhady nebo výpočty činitele zvukové pohltivosti. V další části jsou uvedeny poznatky o využití druhotných surovin v automobilovém průmyslu.

## 2.5.1 Teoretické poznatky o zvukově pohltivém chování vláknenných materiálů

Výzkum teorie šíření zvuku skrz flexibilní porézní média je důležitý pro hodnocení zvukové pohltivosti pěnových materiálů nebo textilií (tkaniny, netkané textilie). Tyto materiály mohou být použity jako akusticky účinné prvky (obklady stěn, zvukové bariéry, akustické stropní podhledy ...) [26, 27, 28].

C. Zwikker a C. W. Kosten [29] poskytli první monumentální práci v této oblasti. Jejich teoretický model je schopen odhadnout činitel zvukové pohltivosti pro různé druhy materiálů jako funkci tloušťky, poróznosti, vláknenného objemu a dalších vnitřních charakteristik. Například akustické chování nepropustných vláknenných materiálu může být předpovězeno z hodnot jejich tloušťky  $K$ , hustoty  $\rho$  a ztrátového úhlu  $\delta$  nebo vlnového odporu  $W$  a propagační konstanty  $\gamma$ . Z textilního hlediska je důležitější teorie pohlcování zvuku homogenními porézními a elastickými vrstvami. Autoři pohlížely na vláknennou vrstvu (porézní médium) jako na směs dvou fází, vzduchu a vláken. Pro řešení byly použity dvě pohybové rovnice a dvě rovnice kontinuity pro vlákna a vzduch.

Pohybové rovnice jsou

$$-\frac{\partial p_1}{\partial x} = \rho_1 \frac{\partial v_1}{\partial t} + s(v_1 - v_2) \quad (17)$$

a

$$-\frac{\partial p_2}{\partial x} = \rho_2 \frac{\partial v_2}{\partial t} + s(v_2 - v_1), \quad (18)$$

kde index 1 značí vláknennou fázi a index 2 vzdušnou fázi,  $p$  tlak,  $\rho$  hustotu,  $v_1$  rychlost pevných částic (vláken) a  $v_2$  rychlost vzduchu.

Spojovací koeficient  $s$  označuje tření mezi vláknennou a vzdušnou fází a je dán vztahem

$$s = j\omega\rho_2(k-1) + h^2\sigma, \quad (19)$$

kde  $\omega$  je úhlová frekvence,  $\rho_2$  hustota vzduchu,  $k$  konstanta struktury,  $h$  poróznost a  $\sigma$  měrný odpor.

Rovnice kontinuity

$$-\frac{\partial p_1}{\partial t} = K_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} - \frac{1-h}{h} \frac{\partial p_2}{\partial t} \quad (20)$$

a

$$-\frac{\partial p_2}{\partial t} = hK_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} + (1-h)(K_2 - P_0) \frac{\partial v_1}{\partial x}, \quad (21)$$

kde  $K_1$  je měrná tuhost rámu,  $K_2$  modul vzduchu a  $P_0$  atmosférický tlak.

Matematické řešení předchozích rovnic ukázalo, že existují dvě vpřed směřující a dvě zpětné vlny pohybující se oběma fázemi vlákenné vrstvy.

Numerická metoda Y. Shoshaniho a Y. Yakubova [30] pro výpočet akustického chování vlákenných vrstev navazuje na studii C. Zwickera a C. W. Kostena o šíření zvuku skrz porézní média. Teoretické výsledky nanovlákenných vrstev vyrobených z akrylových, bavlněných a polyesterových vláken se shodují s experimentálně zjištěnými daty. V tomto modelu je činitel zvukové pohltivosti vlákenných vrstev funkcí jejich tloušťky a porózy. Tento vztah by mohl sloužit jako směrnice pro optimální návrh pasivních kontrolních součástí nanovlákenných vrstev. Ve svém dalším modelu [31] používají číselné výpočty některých strukturních charakteristik vlákenných materiálů vysoce zvukově pohltivých v rozsahu slyšitelných frekvencí. Výsledky mohou sloužit jako směrnice pro optimální přípravu akustických médií vyrobených textilním vrstvením.

Článek [32] se zabývá aplikací netkané textilie s optimální strukturou kombinovanou z více vlákenných vrstev jako zvukově pohltivého prvku. Tyto kombinace mohou být simulovány jako jedna vrstva s proměnlivými vlastnostmi podél šíření zvukové vlny. Y. Shoshani a Y. Yakubov zkoumali změnu pórovitosti na činiteli zvukové pohltivosti pro tři vlákenné vrstvy vyrobené z bavlněných, akrylových a polyesterových vláken. Numerický výpočet se zakládal na zobecněné teorii C. Zwickera a C. W. Kostena o průchodu zvuku porézními médii. Byly uvažovány čtyři funkční závislosti propustnosti: lineární, kvadratická, exponenciální a logaritmická. Jejich výsledky ukázaly, že všechny materiály stanovené logaritmickou závislostí mají nejvyšší činitel zvukové pohltivosti při frekvenci  $f = 1000$  Hz.

Téměř empirická predikční metoda pro zjišťování akustických vlastností vlákenných materiálů R. Kirbyho a A. Cummingse [33] přináší lepší výsledky než předešlé nízko-frekvenční modely (např. M. E. Delanyho a E. N. Bazleye [34]).

Akustické chování flexibilních vlákenných materiálů bylo studováno v práci M. D. Dahla [35]. Materiál byl vyroben z válcovitě tvarovaných vláken, uspořádaných paralelně k čelu rouna. Tento typ materiálu byl považován za anizotropní s akustickou

mírou přenosu závislou na směru šíření zvuku (rovnoběžně nebo kolmo) vzhledem k uspořádání vláken.

V průběhu stlačování vlákenného materiálu zvuková pohltivost klesá. Aby se dala tato změna předpovídat, byly navrženy rovnice, které počítají se změnou fyzikálních parametrů (pórovitost, odpor, křivost a tvarový faktor) vstupujících do Johnson-Allardova modelu „ekvivalentní kapaliny“ [36]. Model uvedený v práci S. Rossettiho [37] zkoumá účinek tvarového faktoru a pórovitosti na zvukovou pohltivost (souvislost mezi fyzikálními vlastnostmi a akustickým chováním). Akustické porézní materiály (skelná vata a polymerní pěny) jsou často používány k ochraně proti hluku a vibracím. Práce [38] zkoumá vliv elastických a tlumících vlastností těchto materiálů na zvukovou pohltivost.

Zdokonalením Delany - Bazleyova a Mikiho modelu se zabývá práce T. Komatsu [39]. Naměřené hodnoty akustických vlastností a měrného odporu vzduchu pro vlákenné materiály byly srovnávány s běžnými metodami. Ukázalo se, že tento model je efektivní pro predikci vysoko-hustotních vlákenných materiálů.

N. Voronina [40] navrhla model, který může být užíván pro predikci akustické impedance a činitele zvukové pohltivosti. Z její další práce [41] vyšly empirické vztahy mezi akustickými parametry a strukturálními vlastnostmi, které sloužily jako podklad pro model predikce hodnot činitele zvukové pohltivosti. Další její experiment [42] zkoumal akustické chování vlákenných materiálů s flexibilní konstrukcí. Charakteristická impedance a konstanty šíření byly změřeny pro extra tenká skleněná vlákna o různém průměru a měrné hustotě. Z experimentálních výsledků byly odvozeny empirické vztahy mezi akustickými parametry a fyzikálními veličinami charakterizující vnitřní střední makrostrukturu. Tento model může sloužit k predikci hodnot akustické impedance a činitele zvukové pohltivosti vlákenných vrstev, pokud je známý průměr vláken a měrná hustota.

Sledováním tepelné a viskózní difúze v porézních médiích jako relaxačních procesů je vyvinut jednoduchý model pro šíření zvuku v těchto materiálech v práci D. K. Wilsona [43]. Autor porovnává tři existující modely: Delany-Bazleyovy empirické rovnice, Biot-Allardův mikrostrukturální model, a Champoux-Stinsonův zobecněný mikrostrukturální model.

P. P. Narang ve své práci [44] prezentuje empirickou rovnici využívající parametr odpor proudění ve vztahu k počtu vláken v objemu materiálu pro predikci činitele pohltivosti materiálů z polyesterových vláken. Rovnice vychází z empirické

predikční rovnice pro skleněná vlákna. M. Garai a F. Popoli vyvinuli ve své práci [45] empirický model pro predikci odporu proudění, akustickou impedanci a činitel zvukové pohltivosti pro materiály z polyesterových vláken s různou tloušťkou a hustotou.

V článku Y. Lee a Ch. Joo [46] byl zkoumán činitel zvukové pohltivosti netkaných textilií vyrobených z recyklovaného polyesteru za účelem náhrady konvenčně používaných materiálů jako je skelná vata a minerální plst'. Použití těchto netkaných textilií má mnoho výhod oproti konvenčním zvukovým absorbérům. Jedná se především o snížení ceny výrobku, dobrou manipulaci a ochranu životního prostředí. Činitel zvukové pohltivosti zmiňovaných textilií byl určen pomocí dvou-mikrofonové impedanční měřicí trubice. Poté byl stanoven vztah mezi naměřenými hodnotami zvukové pohltivosti a parametry netkané textilie zahrnují vlastnosti vláken a pavučiny.

Tento materiál [47] zkoumá použití tkanin z mikrovláken jako zvukově pohltivého materiálu. Činitel zvukové pohltivosti byl měřen u 5 tkanin z mikrovláken a 1 klasické tkaniny v dozvukové místnosti. Výsledky ukázaly, že tkaniny z mikrovláken lépe pohlcují zvuk než ty klasické při stejné tloušťce a hmotnosti. Dále se zjistilo, že větší vliv na zvukovou pohltivost má hustota tkaniny než tloušťka a hmotnost.

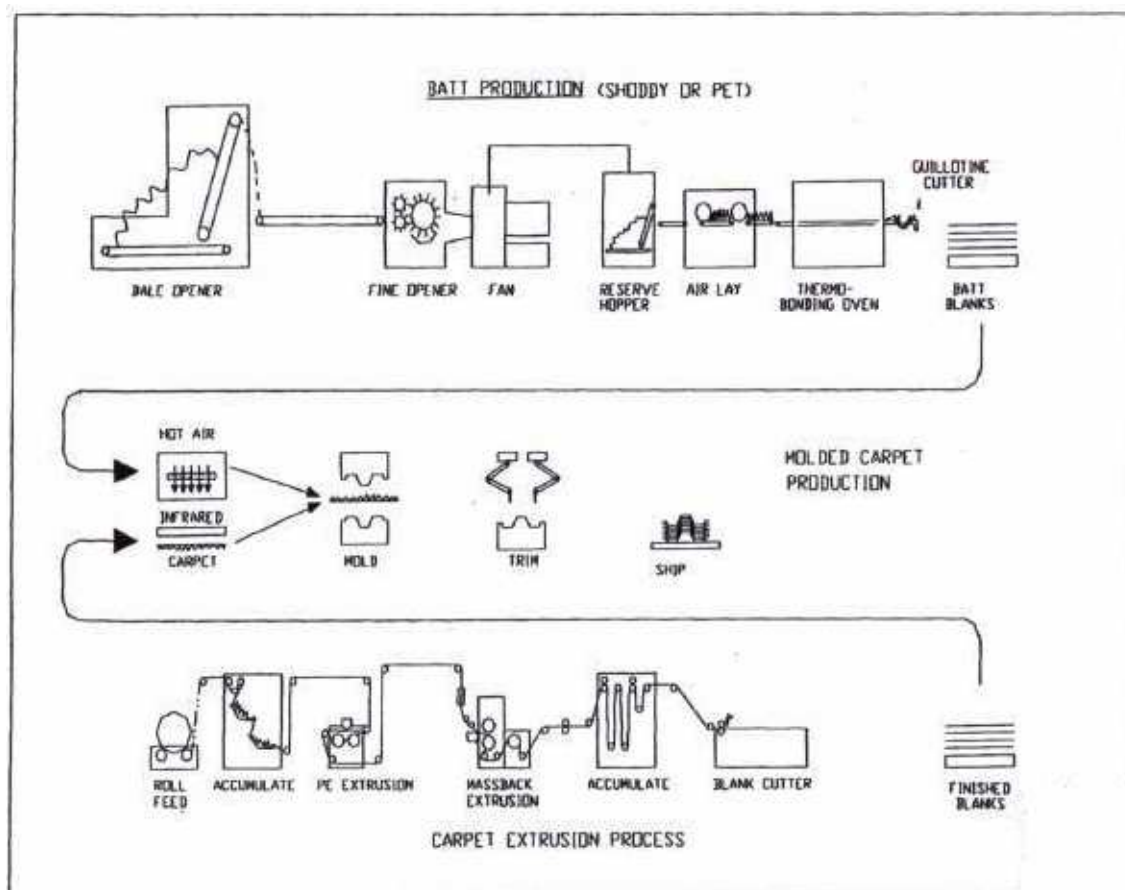
V práci [48] se vzorky netkaných textilií skládaly ze dvou vrstev – základní a krycí. Základní vrstva byla vyrobena mykáním a vpichováním bavlny, ramie a polypropylenu. Krycí vrstva byla vyrobena z aktivních uhlíkových vláken (ACF) a skleněných vláken. Vzorky se proměřovaly na impedanční trubici. Výsledky ukázaly, že vzorek s krycí vrstvou ACF je schopen pohlcovat nízké frekvence a nezáleží na základní vrstvě (činitel zvukové pohltivosti byl vždy nad 0,5 při frekvenci 500 Hz). Karbonizace a regenerace je termochemický postup, který převádí textilní vlákna, příze a textilie na aktivní uhlíkové materiály. Takto upravené materiály mají velký specifický povrch, makropóry mezi vlákny a přízemi a mikropóry na povrchu aktivovaného uhlíkového vlákna. Proto tyto materiály pohlcují nízké frekvence.

Práce [49] využívá bambusové vlákno jako zvukově pohltivý materiál. Činitel zvukové pohltivosti se měřil impedanční trubicí v závislosti na tloušťce vzorku, vzdálenosti od odrazivé stěny, hustotě a průměru bambusového vlákna. Výsledky ukázaly, že bambusový vlákenný materiál má stejné zvukově pohltivé vlastnosti jako skelná vata a činitel zvukové pohltivosti se ještě zvyšoval s rostoucí hustotou.

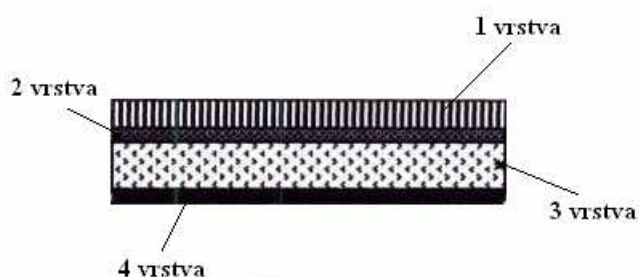
## 2.5.2 Poznatky o využití DS v automobilovém průmyslu

Eliminací nechtěného zvuku v kabinách automobilů se zabývá práce D.V. Parikha, Y. Chena, a L. Suna [50]. K redukci hluku a jeho zdrojů se v současnosti používá několik metod. Jedna z metod využívá zvukově pohltivé materiály, které se skládají z různých komponent: koberce, obklady dveří, obložení stropu kabiny a zavazadlového prostoru. Přírodní vlákna jsou zvukově pohltivé materiály, které jsou recyklovatelné a biodegradabilní čehož se využívá v automobilovém průmyslu. Technologií mykáním a vpichováním byla ze směsi polypropylenu (PP), polyesteru (PL) a přírodních vláken (konopí, juty, lnu nebo bavlněného odpadu) vyrobena netkaná textilie, která se použila jako koberec. Pro porovnání se na část koberců nanasla vrstva polyuretanové pěny nebo jemných bavlněných vláken. Měření se provádělo na dvou-mikrofonové impedanční trubici. Zjištěné činitele zvukové pohltivosti se pohybovaly v kmitočtovém rozsahu 100 až 3200 Hz. Měření ukázala, že každé přírodní vlákno přispělo ke snížení hluku. Nejvíce hluku pohlcovala netkaná textilie s vrstvou polyuretanové pěny např. při frekvenci 3200 Hz byl činitel zvukové pohltivosti 1 a u netkané textilie s vrstvou jemných bavlněných vláken byl 0,81.

Studie S. Khambete a S. Mehta [51] využívá různorodého odpadu (vláken a přízí) pro výrobu akustických automobilových komponent. Cena, hmotnost, akustický výkon a recyklovatelnost jsou důležité požadavky v automobilovém průmyslu. Tyto výrobky vyžadují systematický přístup, který bere v úvahu faktory jako jsou vlastnosti materiálu, manipulaci, proces a logistiku. Na obr. 16 je uvedeno schéma výrobní linky. Akustické systémy jsou různé pro každé vozidlo. Cílem je vyrobit lehké komponenty s rovnováhou zvukové ztráty přenosu a absorpcí zvuku. Kritéria pro zvukovou ztrátu přenosu jsou např. objem, odpor mezi vlákennými vrstvami a pro absorpci zvuku např. odpor proudění, parametry materiálu (struktura, tvar, povrch vláken, orientace vláken). Uspořádání akustického systému je znázorněno na obr. 17. Výrobky se používají jako výztuž palubní desky a koberců.



**Obr. 16:** Schéma výrobní linky, čerpáno z [51].



**Obr. 17:** Typické uspořádání akustického systému, čerpáno z [51].

1 vrstva – vizuální povrch (trvanlivý, porézní, snadno čistitelný), 2 vrstva – objemná vrstva nebo akustický prvek (spojuje vrstvu 1 a 3), 3 vrstva – z recyklovaných vláken, 4 vrstva – tlumící.

Článek D. V. Parikha a T. A. Calamri [52] popisuje výrobu, fyzikální, mechanické a akustické vlastnosti lisovaných vpichovaných netkaných textilií, které se používají v interiérech automobilů. Pro výrobu těchto netkaných textilií se používají



chemicky máčená konopná nebo jutová vlákna, která se směsují s reznou bavlnou, recyklovaným polyesterem a polypropylenem. Byly vyrobeny těžké vzduchem kladené a vpichované netkané textilie ze dvou typů vláken, které měly uspokojivé výsledky, ale byly méně kompaktní než vpichované textilie. Dále se vyrobily netkané textilie ze směsi různých vláken, které převyšovaly svými vlastnostmi standardní požadavky. Všechny tyto textilie také splňovaly nebo převyšovaly požadavky na hořlavost, zápach, pevnost spojů, pevnost v tahu a prodloužení. Měření činitele zvukové pohltivosti probíhalo na impedanční trubici a výsledné hodnoty snadno dosahovaly stanoveného cíle. Takto vyrobené textilie mohou být použity v interiérech automobilů.

Podmínky recyklačního procesu mohou mít významný vliv na vlastnosti recyklovaného syntetického materiálu. Polypropylenové obalové nádoby nebo vlákna mohou být recyklovány a použity na výrobu nových produktů např. mechanická recyklace se používá pro výrobu velkých polypropylenových automobilových součástí [53]. H. de Feraudy [54] popisuje výrobní zařízení, které produkuje polypropylenové granule z vyřazených obalů od akumulátorů. Proces se skládá z oddělení, obnovení a výroby vysoce-kvalitních materiálů, které jsou vhodné pro použití v automobilovém průmyslu. Výhodou je, že tyto materiály jsou cenově srovnatelné s čistými materiály. Z recyklovaného polypropylen se mohou směšováním s dalšími materiály (skleněná vlákna, guma ..) vyrábět speciální typy materiálů.

Vlákna vyrobená recyklací PET lahví byla srovnávána s vlákny získanými recyklací polyesterového vlákenného odpadu a primárně vyrobenými polyesterovými vlákny. Práce K. Gurudatta [55] ukázala, že vlákna z PET lahví mají shodné vlastnosti jako primární polyesterová vlákna, ale cenově jsou stejné jako vlákenné odpady. Automobilové koberce vyráběné formováním recyklovaných vláken z PET lahví ukázaly výbornou pevnost a mechanické vlastnosti. Používání těchto vláken v automobilových aplikacích může být finančně výhodné.

## 3 Experimentální část

### 3.1 Cíl

Cílem práce bylo zjistit, jak se mění činitel zvukové pohltivosti v závislosti na druhu vláknenného materiálu (zda lze polyester nahradit druhotnými surovinami), tloušťce vzorku a počtu nanovláknenných vrstev.

### 3.2 Příprava vláknenných vrstev a výroba vzorků

Výroba podkladových textilií a následně výroba vzorků probíhala v poloprovozu Katedry netkaných textilií Technické univerzity v Liberci. V této práci byly použity dva typy vláknenných materiálů. První materiál byly druhotné suroviny a druhý polyesterová vlákna. Ke každému materiálu se přidala bikomponentní vlákna. Výsledné směsi se předkládaly vpichovací lince s mykacím strojem a příčným kladečem s následnou vazbou na další mykací stroj. Vláknenná pavučina z posledního mykacího stroje byla odvíjena navíjecím válcem v požadovaném počtu vrstev – 10, 15 a 20. Na zbytek pavučiny byla nanесena nanovláknenná vrstva pomocí laboratorního přístroje Nanospider a odvíjena v tom samém počtu vrstev. Vláknenné vrstvy se dále stříhaly na vzorky o velikosti 150 x 200 mm a stlačovaly na požadované tloušťky 10, 15 a 25 mm pomocí dvou děrovaných mřížek v tepelné komoře. Následně se pomocí lisu a raznice vyrážely vzorky o průměru 29 a 100 mm. Od každého typu 5 vzorků pro statistické vyhodnocení. Výsledných 360 vzorků se proměřovalo na dvou-mikrofonové impedanční trubici.

### 3.3 Výroba vzorků z PL

Netkaná textilie z PL byla vyrobena z 30 navážek po 80 g surovinové směsi tvořené 80% polyesterových vláken a 20% bikomponentních vláken – polyester/co-polyester. Jednotlivé zastoupení, jemnosti a délky vláken:

- Polyesterová vlákna (PL) jsou zastoupena 80%, jemností 6,7dtex a délkou vláken 80 mm.

- Bikomponentní vlákna jádro/plášť (PL/co-PL) jsou zastoupena 20%, jemností 3 dtex a délkou vláken 60 mm.

### **Technologie výroby**

Surovinová směs byla předložena laboratornímu mykacímu stroji kde došlo k rozvolnění, ojednocení, promísení a uspořádání vláken do podélného směru. Přiváděcí rychlost pásu byla 0,225 m/min. Pomocí navazujícího pásového příčného kladeče byla pavučina dopravena do zpevňovacího vpichovacího zařízení s odtahovou rychlostí 0,5 m/min, hloubkou vpichu 5 mm, šířkou 1000 mm a frekvencí desky 200 zdvihů/min. Výsledná pavučina o plošné hmotnosti 27 g/m<sup>2</sup> se přeložila tak, aby vznikly 4 vrstvy, které se předložily dalšímu mykacímu stroji (fy Befama). Jedna polovina pavučiny se odtahovala rychlostí 2,8 m/min rovnou na navíjecí válec, kde se navíjel potřebný počet vrstev – nejprve 10, 15 a následně 20 vrstev. Druhá polovina pavučiny prošla mykacím strojem a byla odtahována rychlostí 1,63 m/min do laboratorního zařízení Nanospider kde byla pomocí elektrostatického zvlákňování nanесena vrstva vodného roztoku polyvinylalkoholu (PVA). Vodný roztok se skládal z 16%-ního PVA, 40%-ního glyoxalu, 85%-ní kyseliny fosforečné a destilované vody (viz Příloha č. 5). Pavučina s nanovláknennou vrstvou byla navíjena na válec se stejným počtem vrstev 10, 15 a 20 jako klasická pavučina.

**Tab. 1:** Podmínky zvlákňování.

zvlákňovací napětí	50,5 kV
velikost proudu	0,31 mA
průměr zvlákňovacího válečku	20 mm
relativní vlhkost okolí	55%
teplota okolí	21°C
relativní vlhkost uvnitř nanospideru	33%
teplota uvnitř nanospideru	30,5°C

Tyto vrstvy se dále stříhaly na rozměr 150 x 200 mm a pomocí dvou mřížek se stlačovaly za tepla v tepelné komoře při 140°C cca 5 min na tloušťku 10, 15 a 25 mm. V tepelné komoře došlo k částečnému zesíťování. Následně se vyrážely vzorky o průměru 29 a 100 mm pomocí raznice v lisovacím zařízení.

Výsledných 180 vzorků bylo připraveno pro měření na dvou-mikrofonové impedanční trubici.

Vzorky o průměru 100 mm byly zváženy za účelem zjištění plošné hmotnosti.

### 3.4 Výroba vzorků z DS

Netkaná textilie z DS byla vyrobena z 30 navážek po 80 g surovinové směsi tvořené 80% druhotných surovin a 20% bikomponentních vláken – polyester/co-polyester. Jednotlivé zastoupení, jemnosti a délky vláken jsou:

- Druhotné suroviny jsou zastoupeny 80% a byly dodány firmou Vest-izol.
- Bikomponentní vlákna jádro/plášť (PL/co-PL) jsou zastoupena 20%, jemností 3 dtex a délkou vláken 60 mm.

Následný postup výroby 180 vzorků je stejný jako u PL.

### 3.5 Použité měřicí zařízení

Měření všech vzorků probíhalo na dvou-mikrofonové impedanční trubici Brüel & Kjaer typ 4206, která je umístěná na Katedře strojů průmyslové dopravy na Technické univerzitě. Měřilo se 360 vzorků s průměrem 29 a 100 mm.

Z důvodu eliminace chyb a následné statistice se proměřovalo od každého typu vzorku 5 kusů. Získané hodnoty byly pomocí softwaru měřicího zařízení převedeny a následně graficky zpracovány v programu Excel. Před každou změnou typu vzorku byl přístroj kalibrován.

### 3.6 Postup měření

Nejprve se vzorky o průměru 100 mm vkládaly do velké nízkofrekvenční trubice kde proměření vzorku trvalo déle. Začínalo se s vzorky o nejnižší tloušťce a počtu vrstev. Pomocí pístu, který simuloval vzdálenost prvku od odrazivé stěny se nastavila vzdálenost 10, 15 a nakonec 25 mm. Před každou změnou tloušťky nebo

materiálu se přístroj kalibroval. U vzorků s průměrem 29 mm, které se vkládaly do malé vysokofrekvenční trubice měření trvalo kratší dobu. Pomocí softwaru měřícího zařízení došlo ke spojení hodnot nízkofrekvenční a vysokofrekvenční trubice. Tím se nám výsledná data zredukovala na polovinu.

### 3.7 Označování vzorků

#### *Označování materiálů*

PL – netkaná textilie z polyesterových a bikomponentních vláken

DS – netkaná textilie z druhotné suroviny a bikomponentních vláken

PLn - netkaná textilie z polyesterových a bikomponentních vláken s vrstvou nanovláken

DSn - netkaná textilie z druhotné suroviny a bikomponentních vláken s vrstvou nanovláken

#### *Počet vrstev vzorku*

→ 10, 15 a 20 mm

#### *Tloušťka vzorků*

→ 10, 15 a 25 mm

#### Příklad označení vzorku:

10\_15v\_PL .... vzorek o tloušťce 10 mm s 15 vláknými vrstvami vyrobený  
z polyesterových vláken

25\_15v\_DSn .... vzorek o tloušťce 25 mm s 15 nanovláknými vrstvami vyrobený  
z druhotných surovin

V tab. 2 (Příloha 6) jsou uvedeny plošné hmotnosti vzorků.

### 3.8 Vyhodnocování grafů

Hodnoty získané z měření na impedanční trubici se vynesly pro lepší přehlednost do grafů. Ze závislosti činitele zvukové pohltivosti na frekvenci se zkoumal vliv:

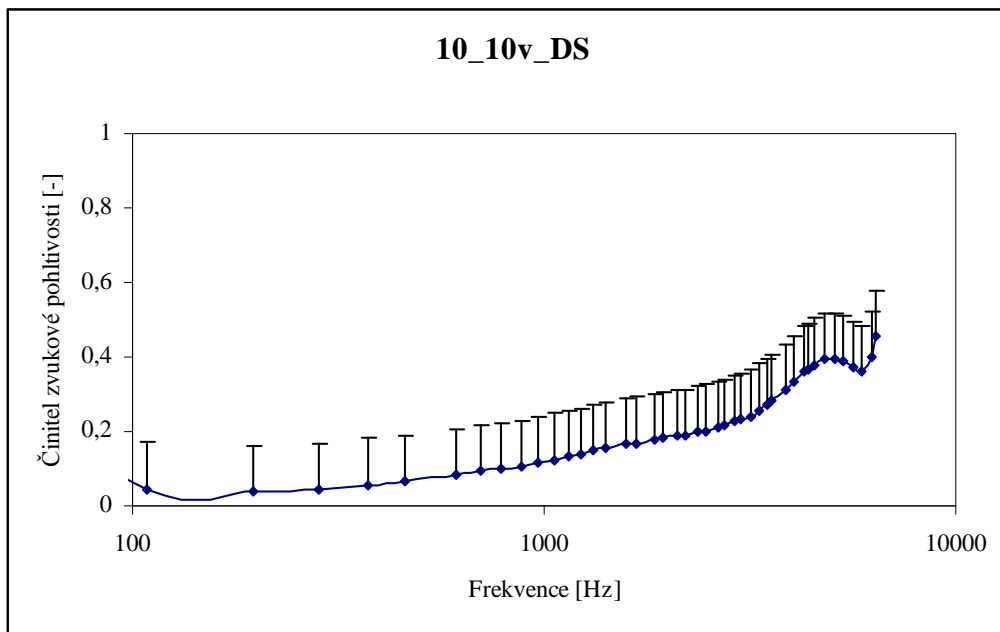
1. počtu vrstev
2. tloušťky vzorků
3. druhu vláknenného materiálu.

### 3.9 Statistika

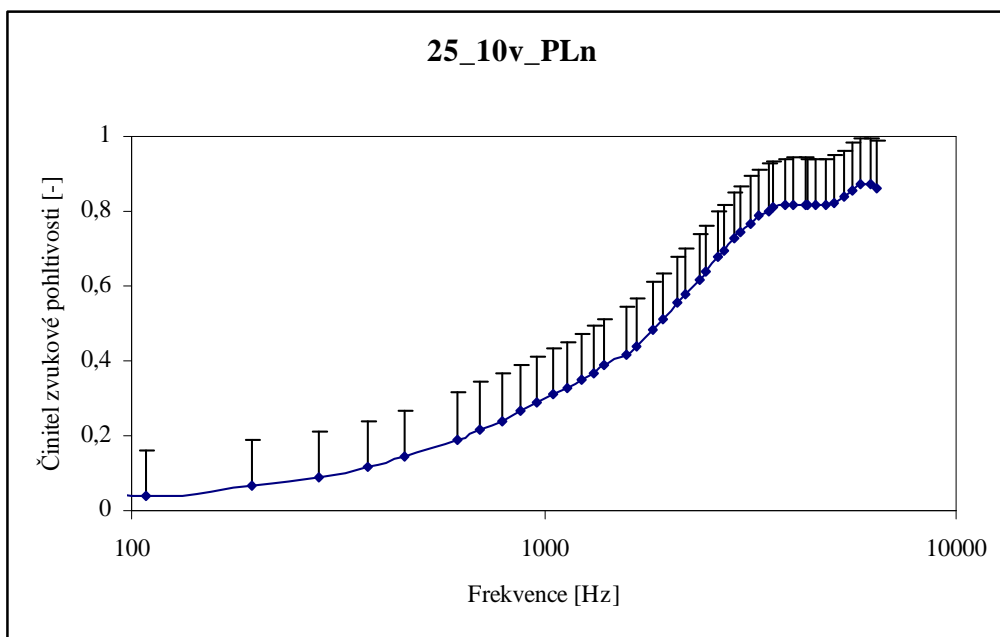
Činitel zvukové pohltivosti byl měřen na 5 vzorcích stejných parametrů, proto aby se mohlo provést statistické vyhodnocení zjištěných hodnot, které určuje chybu měření vláknenného materiálu a přístroje.

Do grafů byla vynášena průměrná hodnota z pěti měření a chybové úsečky, které ukazují jak se naměřené hodnoty liší od průběhu křivky. Chybové úsečky reprezentují směrodatnou odchylku průměrných hodnot.

Výsledné závislosti činitele zvukové pohltivosti na frekvenci se liší velikostí chybových úseček a průměry. Variabilita vzorků je velká. Vzorky se pomocí lisu a raznice obtížně vyráběly a zřejmě toto hledisko způsobilo vysoké hodnoty směrodatných odchylek. Statistické vyhodnocení je pouze orientační, jelikož bylo použito pouze 5 vzorků pro měření zvukové pohltivosti. Na obr. 18 a 19 jsou pro příklad znázorněny závislosti vzorku bez a s nanonovláknennou vrstvou (další grafy viz Příloha 1).



**Obr. 18:** Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorek z druhotných surovin o tloušťce 10 mm a počtu vrstev 10.



**Obr. 19:** Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorek z polyesteru s vrstvou nanovláken o tloušťce 25 mm a počtu vrstev 10.

## 4 Výsledky a vyhodnocení

### 4.1 Vliv počtu vrstev na hodnotu činitele zvukové pohltivosti

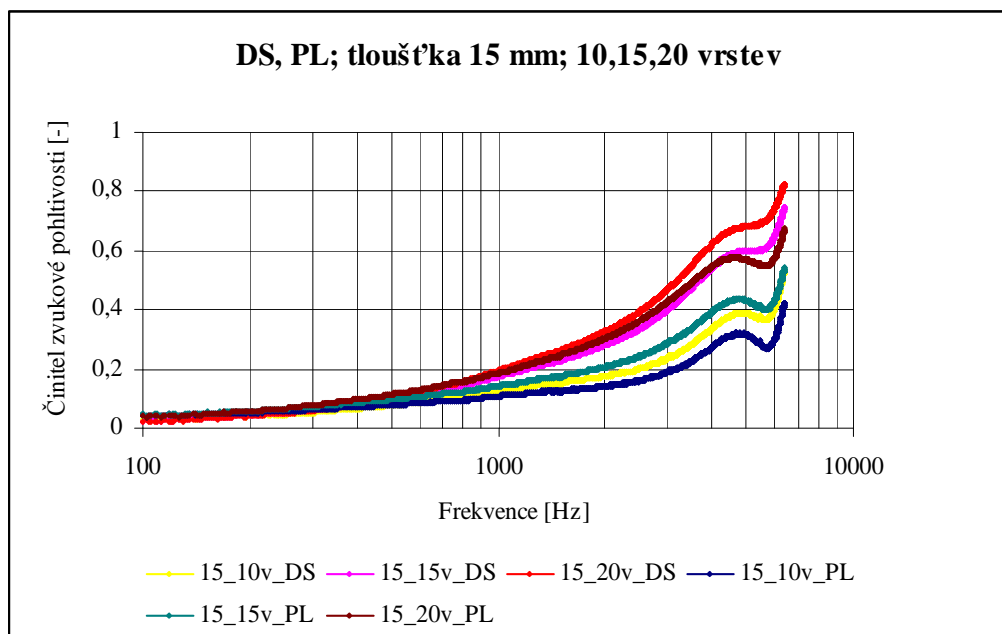
Prvním zkoumaným parametrem byl vliv počtu vrstev na akustické vlastnosti netkané textilie. Křivky v grafech představují naměřenou závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci zvuku. V prvním grafu jsou křivky vzorků se stejnou tloušťkou a různým počtem vláknenných vrstev PL a DS a v druhém se stejnou tloušťkou a s různým počtem vláknenných vrstev PL a DS, které obsahují vrstvu nanovláken. Na obr. 20 a 21 je z grafů hned patrné, že počet vrstev má vliv na činitel zvukové pohltivosti. S počtem vrstev roste činitel zvukové pohltivosti.

V grafu na obr. 20 začíná nárůst křivek až kolem frekvence 1000 Hz. To znamená, že vláknenný materiál bez nanovláken pohlcuje zvuk až při vyšších frekvencích, což je nežádoucí. Lepší pohltivost vykazovaly druhotné suroviny. Nejvyšší hodnota činitele zvukové pohltivosti vzorku druhotných surovin s 20 vrstvami byla necelých 0,7 při frekvenci 5000 Hz.

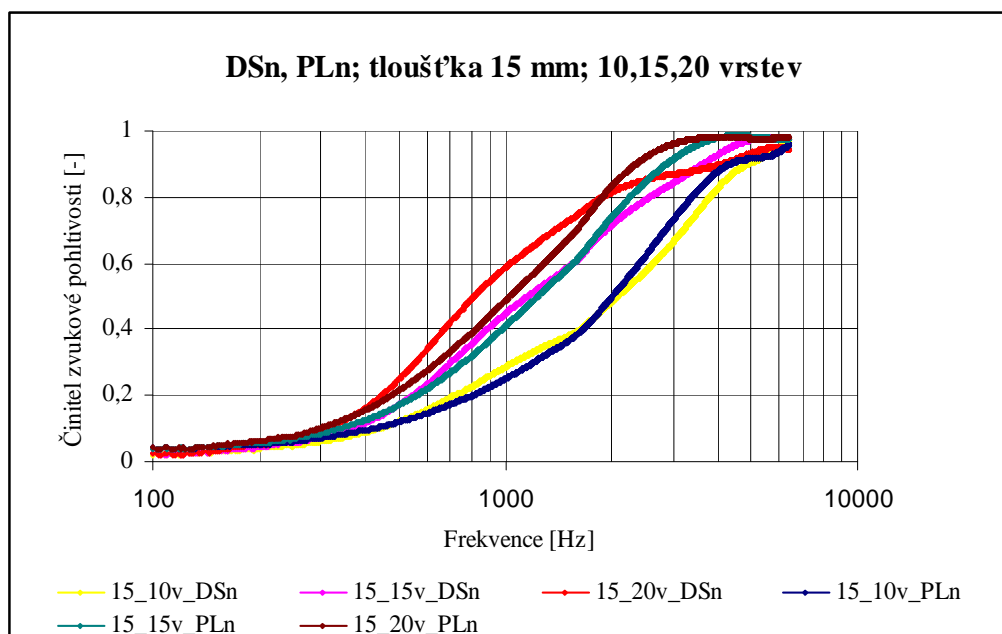
Na obr. 21 je patrný vliv nanovláknenné vrstvy na činitel zvukové pohltivosti. Díky této vrstvě se pohltivost zlepšila u obou netkaných textilií, a to hlavně v nižších frekvencích, důsledkem rezonančního efektu nanovláknenných vrstev. Nárůst křivek začínal už kolem frekvence 300 Hz. Křivky textilie z PL vláken měly pozvolnější nástup než DS. Dále můžeme pozorovat u vzorku DS s 20-ti vrstvami nárůst hodnoty činitele zvukové pohltivosti v oblasti kolem 400 Hz. Ve vyšších frekvencích, ale pohltivost DS s 20-ti vrstvami klesala a rostla u 15-ti vrstev. Nejvyšší činitel zvukové pohltivosti patřil PL s 15-ti vrstvami, jeho hodnota byla 0,98 při frekvenci 4700 Hz.

Absorpční maxima vzorků bez nanovláken rostla s počtem vláknenných vrstev. Nejvyšší pohltivost vykazovaly druhotné suroviny s 15-ti a 20-ti vrstvami pak následoval polyester s 20-ti vrstvami. Vzorky PL s vrstvou nanovláken vykazovaly u 15-ti a 20-ti vrstev maximální pohltivost v nižších frekvencích zatímco vzorky druhotných surovin s tím samým počtem vrstev měly maximální pohltivost při vyšších frekvencích (viz Příloha č. 2).





**Obr. 20:** Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z druhotných surovin a polyesteru o tloušťce 15 mm s různým počtem vrstev 10, 15 a 20.



**Obr. 21:** Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z druhotných surovin a polyesteru o tloušťce 15 mm s různým počtem nanovláknenných vrstev 10, 15 a 20.

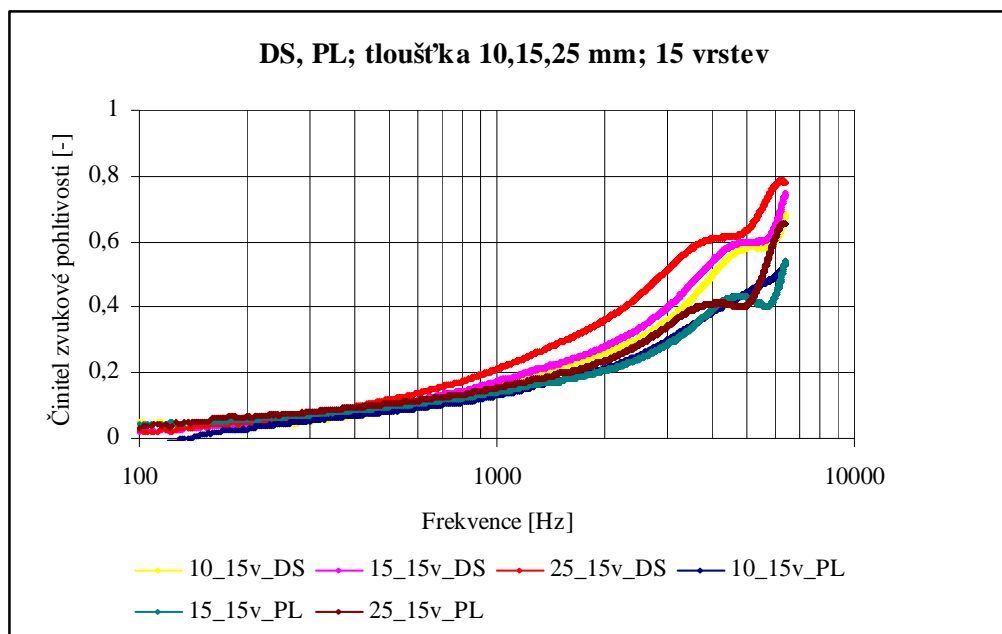
## 4.2 Vliv tloušťky vzorků na hodnotu činitele zvukové pohltivosti

Dalším hodnoceným parametrem, u kterého se předpokládal vliv na akustické vlastnosti podkladové textilie byla tloušťka měřeného materiálu. V jednotlivých grafech jsou porovnávány vzorky s různou tloušťkou a shodným počtem vláknenných vrstev PL a DS tak i PL<sub>n</sub> a DS<sub>n</sub>.

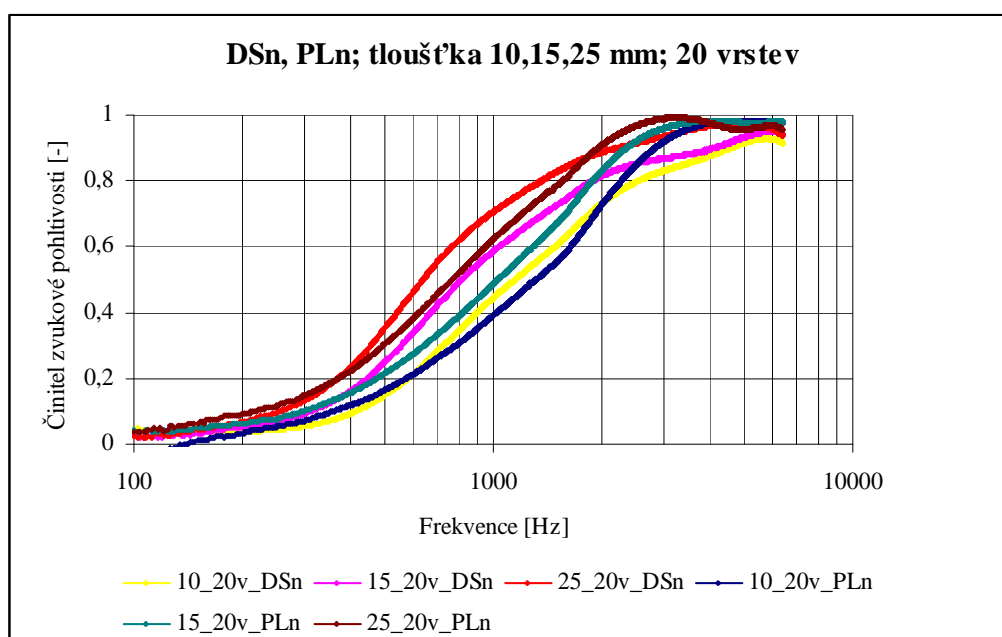
Křivky na obr. 22 vykazují pozvolný průběh. Vzorky DS o tloušťce 10, 15 a 25 mm měly vyšší pohltivost než vzorky PL. Činitel zvukové pohltivosti se pohyboval u DS kolem 0,6 zatímco u PL byl jen kolem 0,4. Vzorek druhotných surovin o tloušťce 25 mm vykazoval pohltivost kolem 0,6 při frekvenci 500 Hz.

Z grafu na obr. 23 je patrný nárůst křivek v nižších frekvencích (kolem 200 Hz). Se zvětšující se tloušťkou vzorku narůstal činitel zvukové pohltivosti v oblasti nižších frekvencí. DS<sub>n</sub> měly vyšší činitel zvukové pohltivosti v rozmezí frekvencí 400 Hz až 2000 Hz než PL<sub>n</sub>. Činitel zvukové pohltivosti vzorku polyesteru o tloušťce 25 mm se blížil 1 při frekvenci 2000 Hz. Zbylé vzorky vykazovaly činitel zvukové pohltivosti kolem 0,98 při vyšších frekvencích (5000 Hz).

U vzorku s 10-ti vláknennými vrstvami se vliv tloušťky vůbec neprojevil – křivky se vzájemně překrývaly. Tloušťka se projevila u vzorků s 15-ti a 20-ti vláknennými vrstvami. Nejvyšší pohltivost měly vzorky DS. Z výsledných grafů je tedy možné pozorovat rozdíl činitele zvukové pohltivosti související s tloušťkou měřených vzorků, který se objevuje u obou typů vláknenných materiálů bez nanovláknenné vrstvy nebo s ní (viz. Příloze č. 3).



**Obr. 22:** Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z druhotných surovin a polyesteru s 15 vláknennými vrstvami o tloušťce 10, 15 a 25 mm.



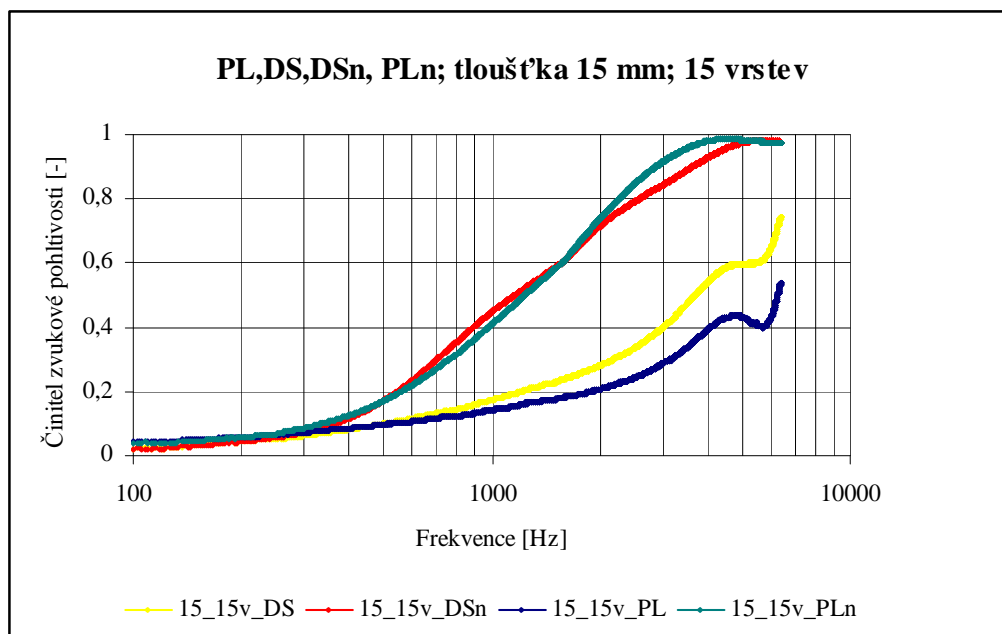
**Obr. 23:** Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z druhotných surovin a polyesteru s 20 nanovláknennými vrstvami o tloušťce 10, 15 a 25 mm.

### **4.3 Vliv druhu vláknenného materiálu na hodnotu činitele zvukové pohltivosti**

Posledním zkoumaným parametrem byl vliv materiálového složení vzorku na akustické vlastnosti. Následující graf na obr. 24 zachycuje průběhy křivek vzorků PL, PLn, DS a DS<sub>n</sub> s 15 vrstvami o tloušťce 25 mm. Z výsledných průběhů je na první pohled patrný rozdíl v hodnotách činitele zvukové pohltivosti tak i ve frekvencích, kdy dochází k pohlcování zvuku. Vzorky s nanovláknennou vrstvou potvrdily vyšší činitel zvukové pohltivosti v oblasti nižších frekvencí zatímco vzorky bez nanovláknenné vrstvy pohlcovaly pouze ve vyšších frekvencích. Nárůst křivek u PLn a DS<sub>n</sub> začínal už při frekvenci 300 Hz. Dále je možné z grafického porovnání křivek pozorovat vyšší činitel zvukové pohltivosti při nižších frekvencích u vzorku PLn. Naproti tomu vzorek DS<sub>n</sub> vykazoval vyšší pohltivost v rozmezí frekvencí 500 Hz až 1600 Hz.

Ve výsledných grafech lze vyčíst vliv tloušťky vzorků PLn a DS<sub>n</sub> na hodnotu činitele zvukové pohltivosti kolem frekvence 5000 Hz. Při hodnocení vzorků o tloušťce 10 mm se vyšší pohltivost projevila u PLn zatímco u vzorků o tloušťce 25 mm dosahovaly maximální pohltivosti DS<sub>n</sub> (viz Příloha č. 4).

Vzhledem k výsledkům je zřejmé, že vzorky druhotných surovin mohou bez výrazného rozdílu činitele zvukové pohltivosti nahradit ty z polyesteru.



**Obr. 24:** Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z PL, PLn, DS a DS s 15 vrstvami o tloušťce 15 mm

## 5 Závěr

Cílem této práce bylo zjistit zda druhotné suroviny mohou nahradit drahá primární vlákna. Proto se zkoumal vliv druhu vlákenného materiálu, tloušťka vzorku a počet nanovlákných vrstev na průběh činitele zvukové pohltivosti.

Prvním měřením a studovaným parametrem byl vliv počtu vrstev na akustické vlastnosti netkané textilie. Výsledky ukázaly, že s počtem vrstev roste činitel zvukové pohltivosti. Dále se projevil pozitivní vliv nanovlákné vrstvy posunutím absorpčního maxima do nižších frekvencí u obou netkaných textilií.

Dalším zjišťovaným vlivem byla závislost tloušťky vzorku na činitele zvukové pohltivosti. Výsledné průběhy v tomto směru neukázaly nic nečekaného. Pouze naplnily předpoklad toho, že vzorky se zvětšující se tloušťkou vykazují lepší zvukově pohltivé vlastnosti v oblasti nízkých kmitočtů. To je způsobeno tím, že dopadající zvukové vlnění uvede nanovláknou vrstvu do kmitů. Následně podkladová textilie tlumí kmitu tak, aby bylo co nejvíce energie přeměněno na teplo.

Posledním zkoumaným parametrem byl vliv materiálového složení vzorku. Při hodnocení výsledků byl na první pohled patrný rozdíl v hodnotách činitele zvukové pohltivosti tak i ve frekvencích, kdy dochází k pohlcování zvuku. Vzorky s nanovláknou vrstvou potvrdily vyšší činitel zvukové pohltivosti v oblasti nižších frekvencích zatímco vzorky bez nanovlákné vrstvy pohlcovaly pouze ve vyšších frekvencích.

Na závěr lze konstatovat, že vzorky druhotných surovin mohou bez výrazného rozdílu činitele zvukové pohltivosti nahradit ty z polyesteru.

## 6 Seznam použité literatury

- [1] KALINOVÁ, K.: Zvuková pohltivost vláknenných materiálů s ohledem na charakteristiky struktury. Disertační a habilitační práce. TU v Liberci, 2005, ISBN 80-7083-997-X.
- [2] SVOBODA, E. a kol.: Přehled středoškolské fyziky. Prometheus, Praha 1996. ISBN 80-7196-116-7.
- [3] MECHLOVÁ, E., KOŠTÁL K. a kol.: Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz. 1. vydání, Prometheus, Praha 2001. ISBN 80-7196-151-5.
- [4] NĚMEČEK, P.: Hluk v technické praxi I. TU v Liberci, Liberec 1998. ISBN 80-7083-285-1.
- [5] Sound absorption coefficient. [online] [cit. 29. 2. 2008] Dostupné na World Wide Web: <http://www.bksv.com/3127.asp>
- [6] NOVÝ R.: Hluk a chvění. Vydavatelství ČVUT, Praha 2000, ISBN 80-01-02246-3.
- [7] KUTMAN, O.: Fyzika II (Akustika). Skriptum ČVUT v Praze, Praha 1991, ISBN 80-01-00655-7.
- [8] KOLMER, F., KYNCL, J.: Prostorová akustika. 2. vydání, SNTL ,Praha, 1982.
- [9] Measurements in Building Acoustics. Brüel & Kjær, Nærum, 1988. [cit. 11. 3. 2008] Dostupné na World Wide Web: [http://www.bksv.com/pdf/Measurements\\_in\\_Building\\_Acoustics.pdf](http://www.bksv.com/pdf/Measurements_in_Building_Acoustics.pdf)
- [10] Brüel & Kjær, Denmark: Sound & Vibration Measurement. Nærum 2000 – 2002.
- [11] Školící a pilotní pracoviště TU v Liberci [fotografie měřící impedanční trubice], [online] [cit. 4. 3. 2008] Dostupné na World Wide Web: [http://www.ksd.vslib.cz/skolici\\_pracoviste/](http://www.ksd.vslib.cz/skolici_pracoviste/)
- [12] JIRSÁK, O., KALINOVÁ, K.: Netkané textilie. Skripta TU v Liberci, Liberec 2003. ISBN 80-7083-746-2.
- [13] DOSTÁLOVÁ, M., KŘIVÁNKOVÁ M.: Základy textilní a oděvní výroby. 2. vydání, skripta TU v Liberci, Liberec 2001. ISBN 80-7083-504-4.
- [14] MILITKÝ, J.: Textilní vlákna. TU v Liberci, Liberec 2002. ISBN 80-7083-644-X.
- [15] KREBSOVÁ, M.: Nauka o polymerech. Skriptum VŠST, Liberec 1978.
- [16] Textilní odpad.[online][cit. 4. 3. 2008] Dostupné na World Wide Web: [http://etext.czu.cz/img/skripta/64/tf\\_43e-1.pdf](http://etext.czu.cz/img/skripta/64/tf_43e-1.pdf)

- [17] Katedra netkaných textilií TU v Liberci/Ke stažení/ZDS/Historie a současnost recyklace v textilu. [online] [cit. 4. 3. 2008] Dostupné na World Wide Web: [http://www.ft.tul.cz/depart/knt/nove/index.php?obsah=studium/stranky\\_predmetu/zds](http://www.ft.tul.cz/depart/knt/nove/index.php?obsah=studium/stranky_predmetu/zds)
- [18] RŮŽIČKOVÁ, J.: Elektrostatické zvlákňování nanovláken. 2. vydání, TU v Liberci, Liberec 2006. ISBN 80-7372-066-3.
- [19] HEDGE, R. R., DAHIYA, A., KAMATH, M. G.: Nanofiber nonwovens. [cit. 5. 3. 2008] Dostupné na World Wide Web: <http://web.utk.edu/~mse/Textiles/Nanofiber%20Nonwovens.htm>
- [20] FRENOT, A., CHRONAKIS, I. S.: Polymer nanofibers assembled by electrospinning. Current Opinion in Colloid & Interface Science, March 2003, vol. 8, no. 1, p. 64-75.
- [21] HUANG, Z. M., ZHANG, Y. Z., KOTAKI, M., RAMAKRISHNA S.: A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. Composites Science and Technology, November 2003, vol. 65, no. 15, p. 2223-2253.
- [22] Electrospinning. [online] [cit. 4. 3. 2008] Dostupné na World Wide Web: <http://www.che.vt.edu/Wilkes/electrospinning/electrospinning.html>
- [23] SAUTTER, B. P.: Continuous Polymer Nanofibers Using Electrospinning. [cit. 10. 3. 2008] Dostupné na World Wide Web: <http://www.uic.edu/labs/AMReL/NSFREU2005/reports/BrianSautter.pdf>
- [24] JIRSÁK, O., SANETRŇÍK F., LUKÁŠ, D., KOTEK, V., MARTINOVÁ, L., CHALOUPEK, J.: A Method of Nanofibres Production from a Polymer Solution Using Electrostatic Spinning and a Device for Carrying Out the Method. European Patent Office, US2006290031. 2006-12-28.
- [25] Katedra netkaných textilií TU v Liberci/Ke stažení/Výroba a vlastnosti nanovláken. [online] [cit. 4. 3. 2008] Dostupné na World Wide Web: <http://www.ft.tul.cz/depart/knt/nano/nanoact.ppt>
- [26] SHOSHANI, Y.: Effect of nonwoven backings, on the noise absorption capacity of tufted carpets. Textile Research Journal, 1990, vol. 60, no. 8, p. 452.
- [27] SHOSHANI, Y.: Noise absorption by woven fabrics, Applied Acoustics, 1990, vol. 30, no. 4, p. 321 – 333.
- [28] SHOSHANI, Y.: Effect of pile parameters on the noise absorption capacity of tufted carpets. Textile Research Journal, 1991, vol. 61, no. 12, p. 736-742.



- 
- [29] ZWIKKER, C., KOSTEN, C. W.: Sound absorbing materials. Elsevier publishing company, New York 1949.
- [30] SHOSHANI, Y., YAKUBOV, Y.: A model for calculating the noise absorption capacity of nonwoven fiber webs. *Textile Research Journal*, 1999, vol. 69, no. 7, p. 519-526.
- [31] SHOSHANI, Y., YAKUBOV, Y.: Numerical assessment of maximal absorption coefficients for nonwoven fiberwebs. *Applied Acoustics*, January 2000, vol. 59, no. 1, p. 77-87.
- [32] SHOSHANI, Y., YAKUBOV, Y.: Use of nonwovens of variable porosity as noise control elements. *International Nonwovens Journal*, Winter 2001, vol. 10, no. 4, p. 23-28.
- [33] KIRBY, R., CUMMINGS, A.: Prediction of the bulk acoustic properties of fibrous materials at low frequencies. *Applied Acoustics*, February 1999, vol. 56, no. 2, p. 101-125.
- [34] DELANY, M.E., BAZLEY, E.N.: Acoustical properties of fibrous materials. *Applied Acoustics*, April 1970, vol. 3, no. 2, p. 105–116.
- [35] DAHL, M. D., RICE, E. J., GROESBECK, D. E.: Effects of fiber motion on the acoustic behavior of an anisotropic, flexible fibrous material. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1990, vol. 87, no. 1, p. 54-59.
- [36] CASTAGNÈDE, B., AKNINE, A., BROUARD, B., TARNOW, V.: Effects of compression on the sound absorption of fibrous materials. *Applied Acoustics*, October 2000, vol. 61, no. 2, p. 173-182.
- [37] ROSSETTI, S., GARDONIO, P., BRENNAN, M. J.: A wave model for rigid-frame porous materials using lumped parameter concepts. *Journal of Sound and Vibration*, August 2005, vol. 286, no. 1-2, p. 81-96.
- [38] JAOUEN, L., RENAULT, A., DEVERGE, M.: Elastic and damping characterizations of acoustical porous materials: Available experimental methods and applications to a melamine foam. [cit. 12. 3. 2008] Dostupné na World Wide Web: [http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6V1S-4RKDPN3-2&\\_user=640831&\\_coverDate=01%2F14%2F2008&\\_alid=704894160&\\_rdoc=53&\\_fmt=summary&\\_orig=search&\\_cdi=5682&\\_sort=d&\\_docanchor=&view=c&\\_ct=2929&\\_acct=C000034259&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=640831&\\_md5=1678050b8cf5f480a5f1ea160fcfbae9](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V1S-4RKDPN3-2&_user=640831&_coverDate=01%2F14%2F2008&_alid=704894160&_rdoc=53&_fmt=summary&_orig=search&_cdi=5682&_sort=d&_docanchor=&view=c&_ct=2929&_acct=C000034259&_version=1&_urlVersion=0&_userid=640831&_md5=1678050b8cf5f480a5f1ea160fcfbae9)
- [39] KOMATSU, T.: Improvement of the Delany-Bazley and Miki models for fibrous sound-absorbing materials. *Acoustical Science and Technology*, 2008, vol. 29, no. 2, p.121-129.

- 
- [40] VORONINA, N.: An empirical model for rigid frame porous materials with high porosity. *Applied Acoustics*, June 1997, vol. 51, no. 2, p. 181-198.
- [41] VORONINA, N.: Acoustic properties of fibrous materials. *Applied Acoustics*, 1994, vol. 42, no. 2, p. 165-174.
- [42] VORONINA, N.: Improved empirical model of sound propagation through a fibrous material. *Applied Acoustics*, June 1996, vol. 48, no. 2, p. 121-132.
- [43] WILSON, D. K.: Simple, relaxational models for the acoustical properties of porous media. *Applied Acoustics*, March 1997, vol. 53, no. 2, p. 171-188.
- [44] NARAG, P. P.: Material parameter selection in polyester fibre insulation for sound transmission and absorption. *Applied Acoustics*, 1995, vol. 45, no. 4, p. 335-358.
- [45] GARAI, M., POMPOLI F.: A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications. *Applied Acoustics*, December 2005, vol. 66, no. 12, p. 1383-1398.
- [46] LEE, Y., JOO, CH.: Sound absorption properties of recycled polyester fibrous assembly absorbers. *AUTEX Research Journal*, June 2003, vol. 3, no. 2.
- [47] NA, Y., LANCASTER, J., CASALI, J., CHO, G.: Sound Absorption Coefficients of Micro-fiber Fabrics by Reverberation Room Method. *Textile Research Journal*, May 2007, vol. 77, no. 5, p. 330-336.
- [48] CHEN, Y., JIANG, N.: Carbonized and Activated Non-wovens as High-Performance Acoustic Materials: Part I Noise Absorption. *Textile Research Journal*, October 2007, vol. 77, no. 10, p. 785-792.
- [49] KOIZUMI, T., TSUJIUCHI, N., ADACHI, A.: The development of sound absorbing materials using natural bamboo fibers. [cit. 12. 3. 2008] Dostupné na World Wide Web: <http://library.witpress.com/pages/PaperInfo.asp?PaperID=18>
- [50] PARIKH, D. V., CHEN, Y., SUN, L.: Reducing Automotive Interior Noise with Natural Fiber Nonwoven Floor Covering Systems. *Textile Research Journal*, November 2006, vol. 76, no. 11, p. 813-821.
- [51] KHAMBETE, S., MEHTA, S.: Development of Engineered Acoustically Tunable Lightweight Automotive Components Utilizing Waste Fiber/Yarn. The Eighth Annual Conference on Recycling of Fibrous Textile and Carpet Waste, May 2003. [cit. 31. 3. 2008] Dostupné na World Wide Web: [http://www.tfe.gatech.edu/recycle\\_conf](http://www.tfe.gatech.edu/recycle_conf)

- 
- [52] PARIKH, D. V., CALAMRI, T. A., SWAHNEY, A. P. S., BLANCHARD, E. J., et al.: Thermoformable automotive composites containing kenaf and other cellulosic. Textile Research Journal, August 2002, vol. 72, no. 8, p. 668-673.
- [53] Recycling Polypropylene - Rapra Polymer Bulletin [online] [cit. 27. 3. 2008]  
Dostupné na World Wide Web:  
[http://www.rapra.net/products\\_and\\_services/Books/General/General/Recycling\\_of\\_Polypropylene.asp](http://www.rapra.net/products_and_services/Books/General/General/Recycling_of_Polypropylene.asp)
- [54] FERAUDY, de H.: Recycling the plastic components in today's lead/acid battery. Journal of Power Sources, January 1993, vol. 42, no. 1-2, p. 315-318.
- [55] GURUDATT, K., DE, P., RAKSHIT, A. K., BARDHAN, M. K.: Dope-dyed Polyester Fibers from Recycled PET Wastes for Use in Molded Automotive Carpets. Journal of Industrial Textiles, 2005, vol. 34, no. 3, p.167-179.

## 7 Seznam příloh

**Příloha č. 1:** Obr. 25: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z druhotných surovin a polyesteru o různé tloušťce a počtu vrstev.

Obr. 26: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro 5 vzorků z druhotných surovin s 20 nanovláknými vrstvami o tloušťce 5 mm.

**Příloha č. 2:** Obr. 27: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z druhotných surovin a polyesteru o tloušťce 10 mm s různým počtem vlákných vrstev 10, 15 a 20.

Obr. 28: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z druhotných surovin a polyesteru o tloušťce 25 mm s různým počtem vlákných vrstev 10, 15 a 20.

Obr. 29: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z druhotných surovin a polyesteru o tloušťce 10 mm s různým počtem nanovlákných vrstev 10, 15 a 20.

Obr. 30: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z druhotných surovin a polyesteru o tloušťce 25mm s různým počtem nanovlákných vrstev 10, 15 a 20.

**Příloha č. 3:** Obr. 31: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z druhotných surovin a polyesteru s 10 vláknými vrstvami a tloušťkou 10, 15 a 20 mm.

Obr. 32: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z druhotných surovin a polyesteru s 20 vláknými vrstvami a tloušťkou 10, 15 a 25 mm.

Obr. 33: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z druhotných surovin a polyesteru s 10 nanovláknými vrstvami a tloušťkou 10, 15 a 25 mm.

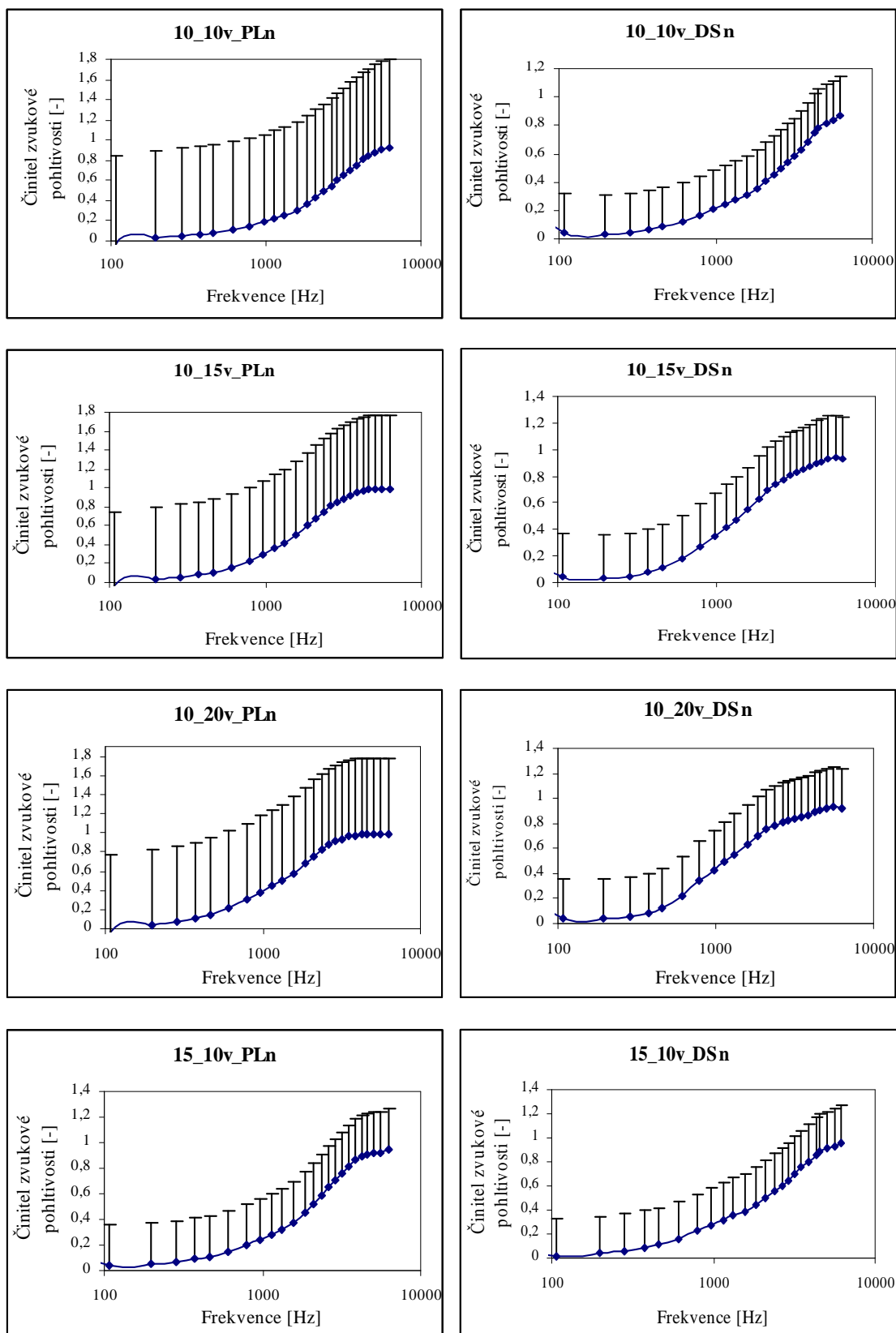
Obr. 34: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z druhotných surovin a polyesteru s 15 nanovláknými vrstvami a tloušťkou 10, 15 a 25 mm.

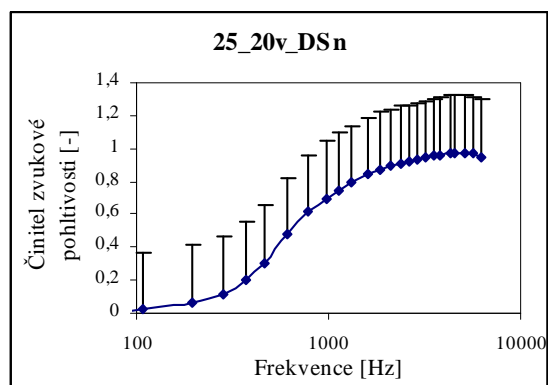
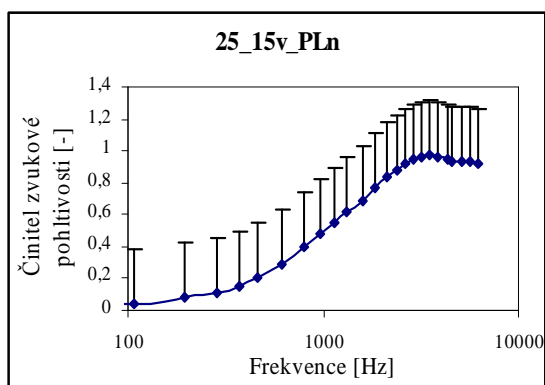
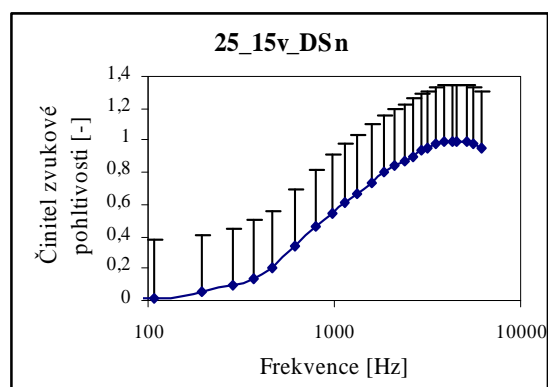
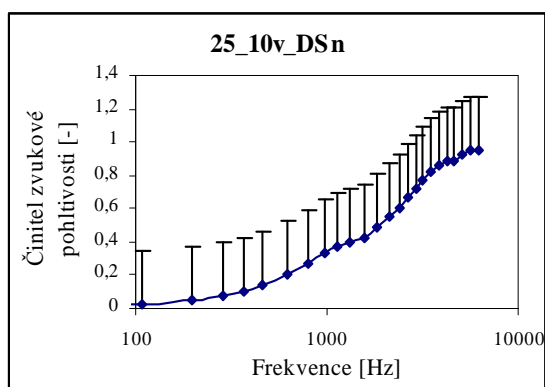
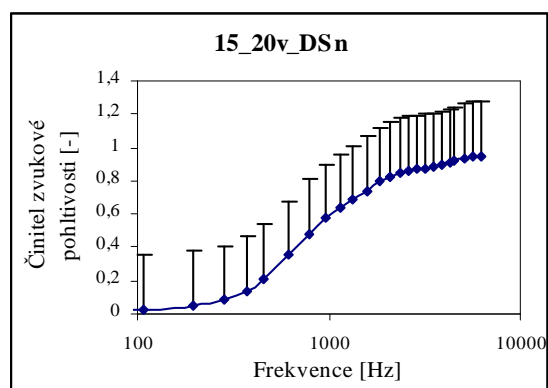
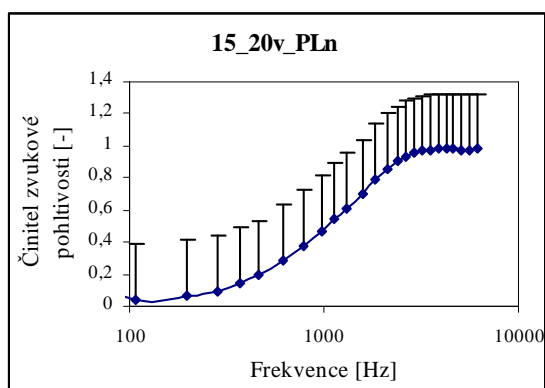
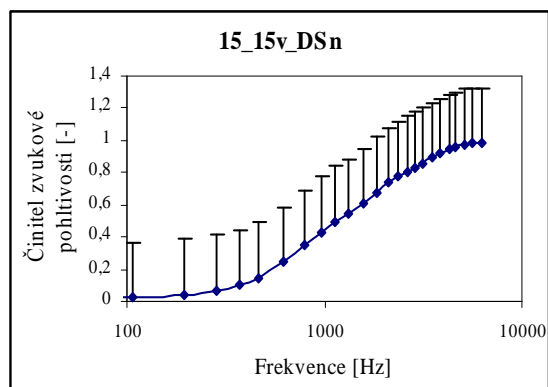
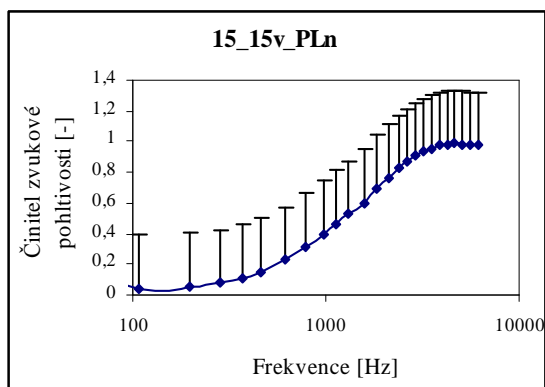
**Příloha č. 4:** Obr. 35: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z PL, PLn, DS a DS s různým počtem vrstev a různou tloušťkou.

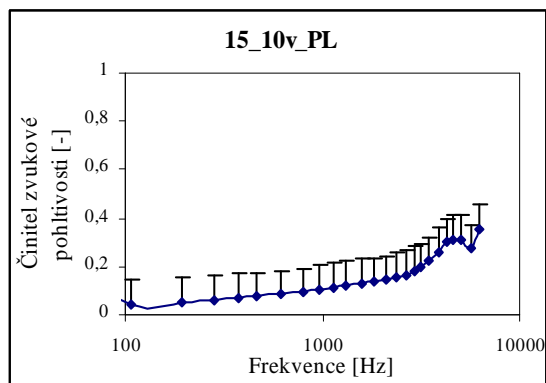
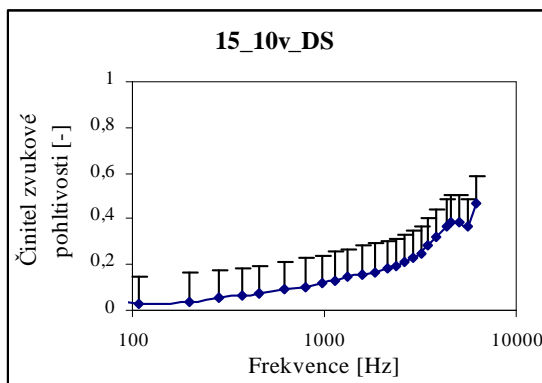
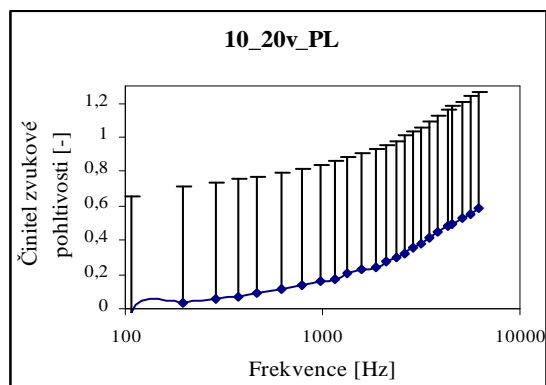
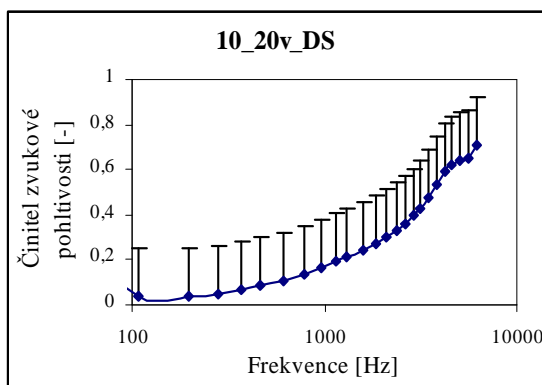
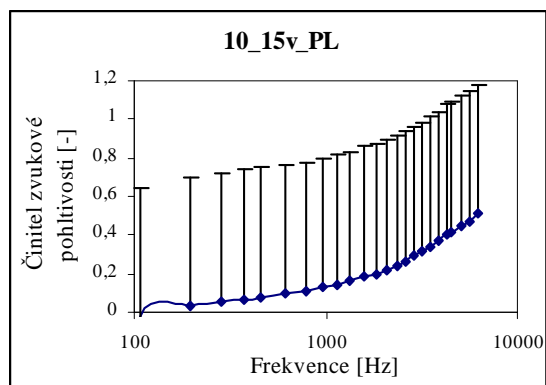
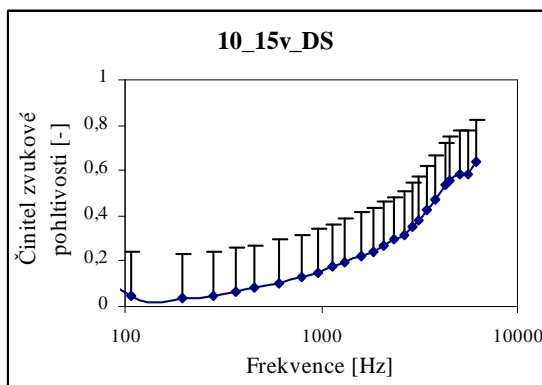
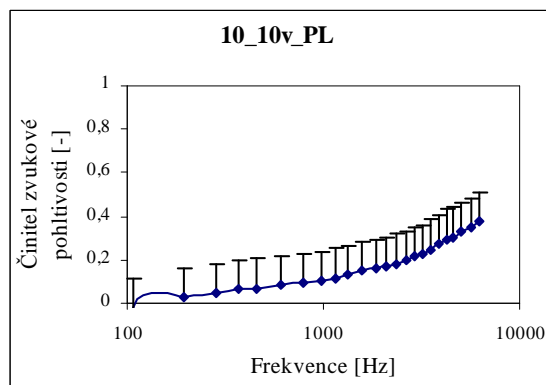
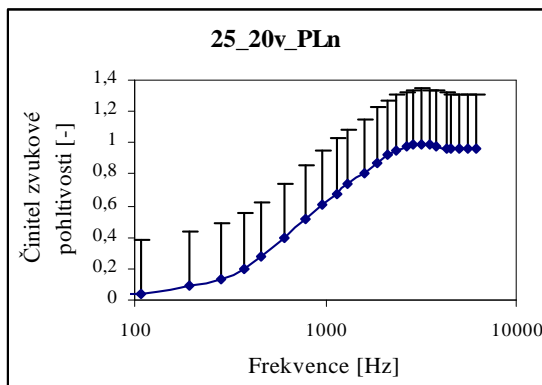
**Příloha č. 5:** Složení zvláknovacího roztoku PVA.

**Příloha č. 6:** Tab. 2 - Plošné hmotnosti vzorků.

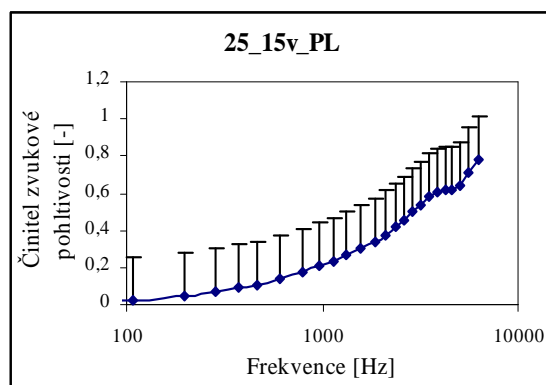
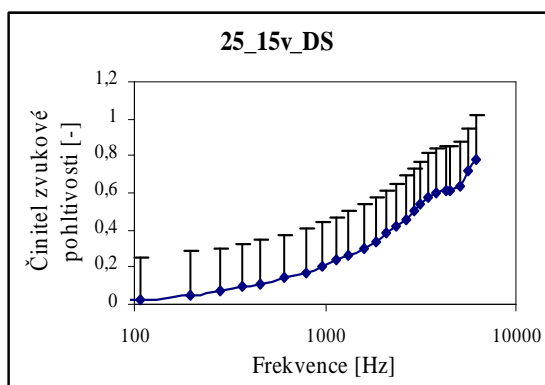
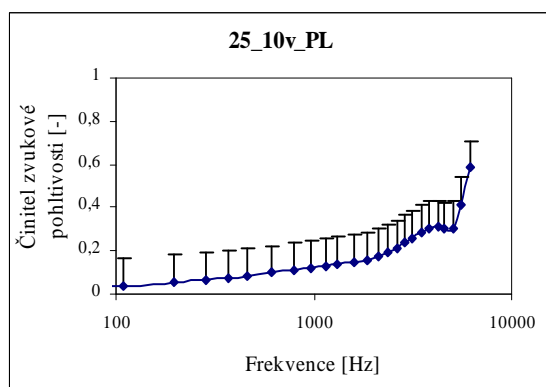
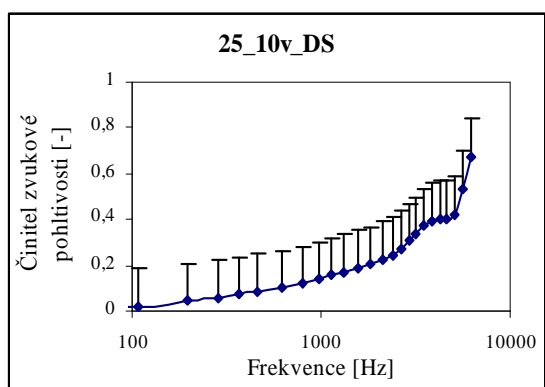
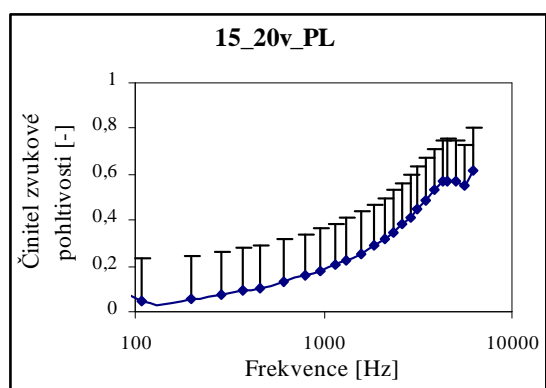
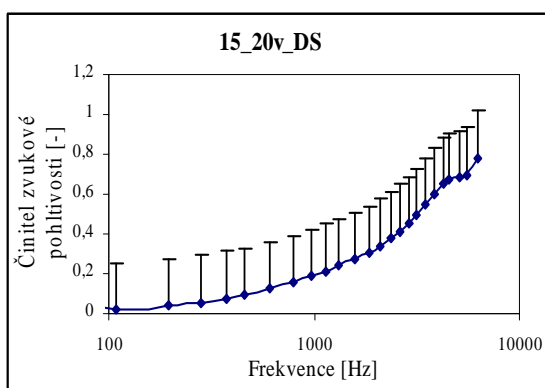
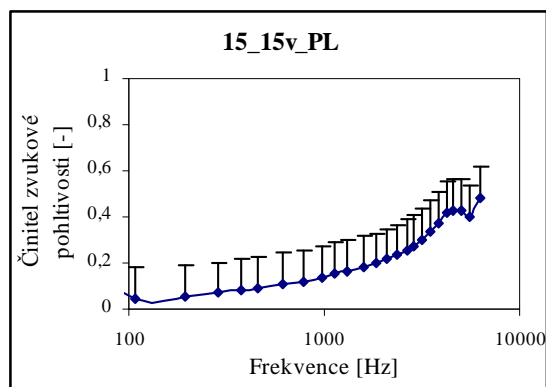
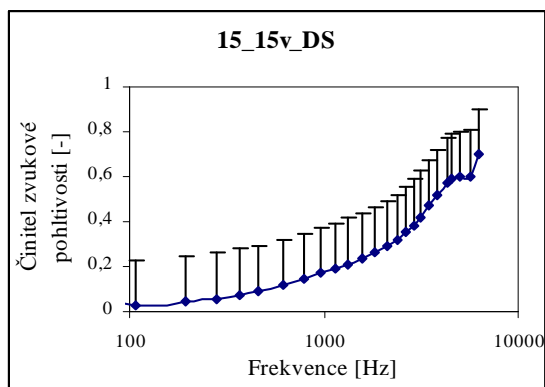
## Příloha č. 1

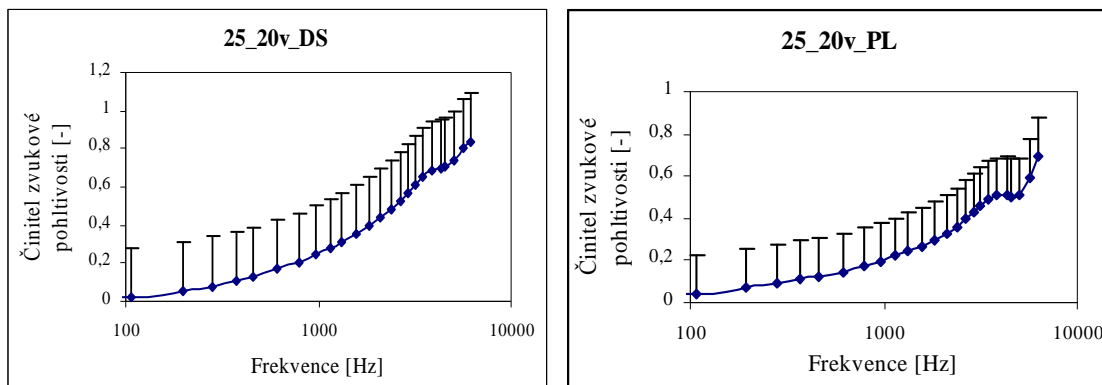




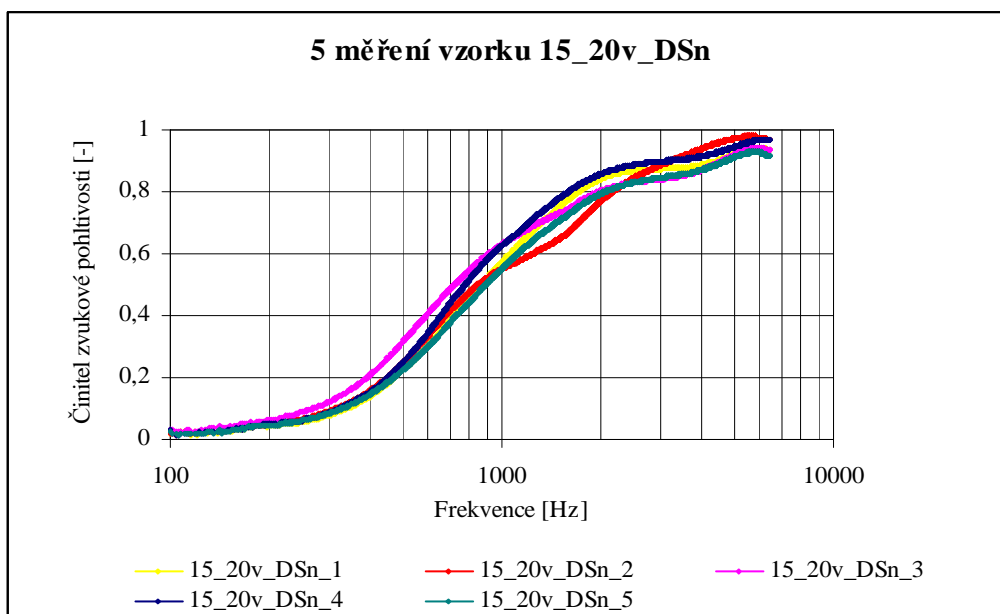






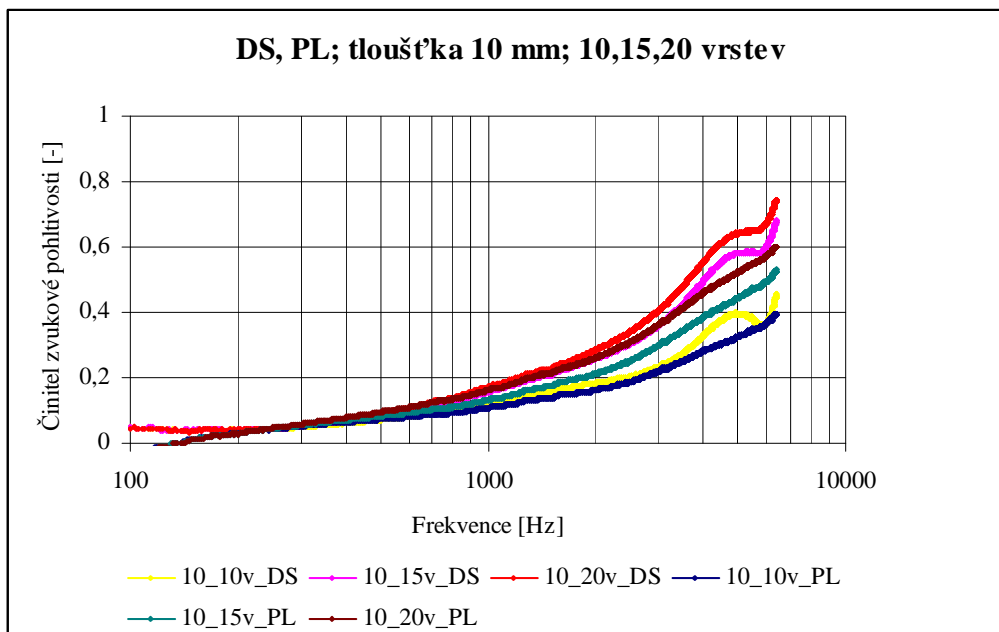


**Obr. 25:** Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z druhotných surovin a polyesteru o různé tloušťce a počtu vrstev.

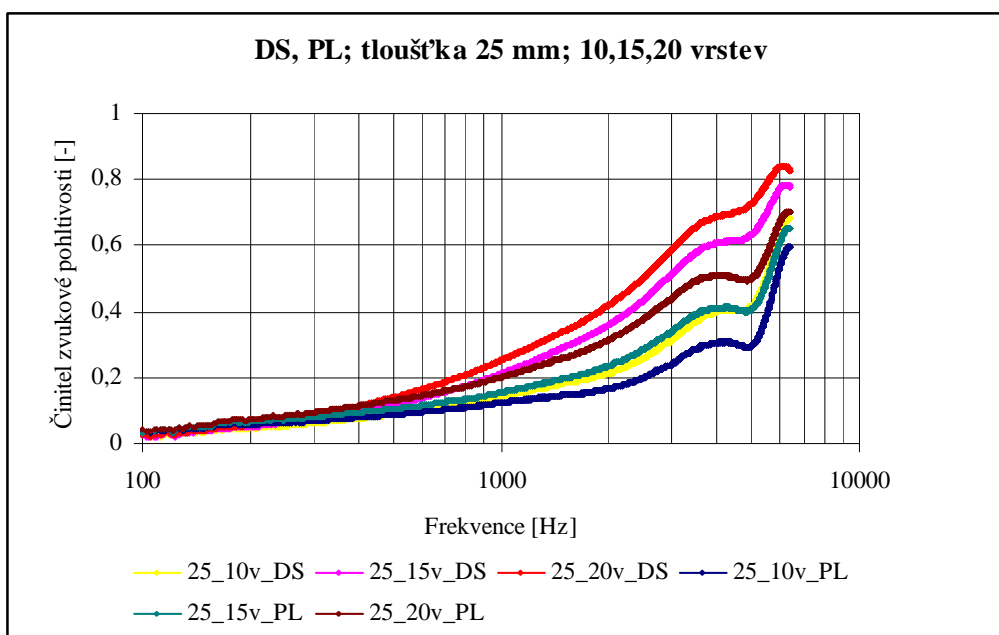


**Obr. 26:** Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro 5 vzorků z druhotných surovin s 20 nanovláknými vrstvami o tloušťce 15 mm.

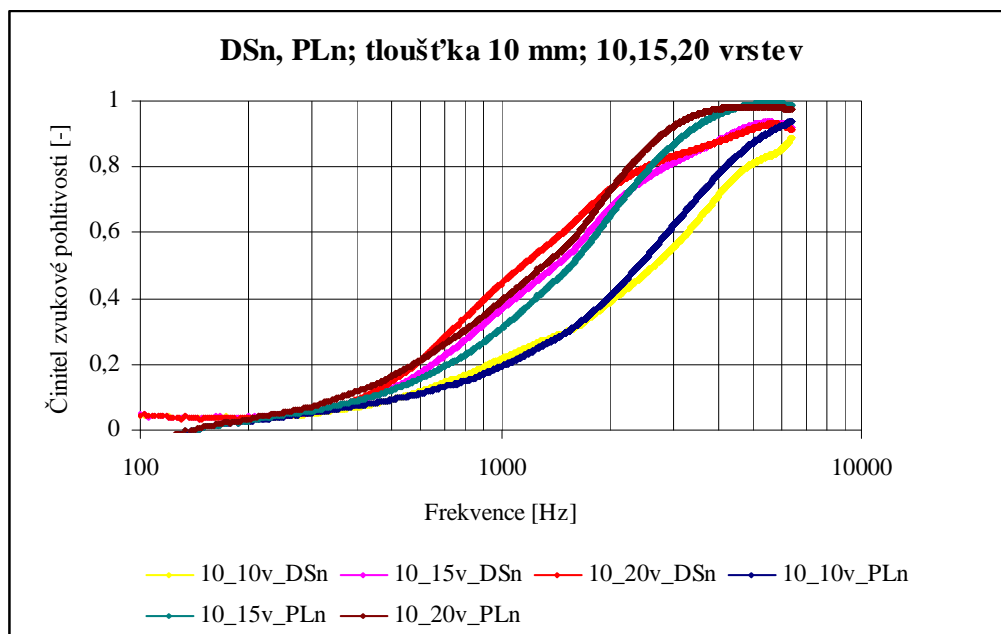
## Příloha č. 2



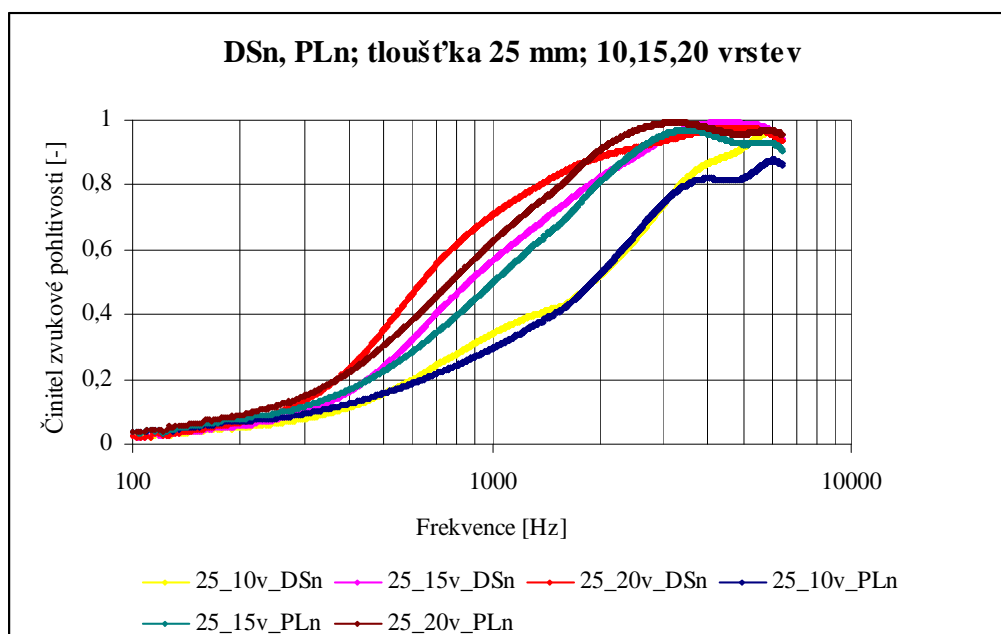
**Obr. 27:** Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z druhotných surovin a polyesteru o tloušťce 10 mm s různým počtem vlákněných vrstev 10, 15 a 20.



**Obr. 28:** Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z druhotných surovin a polyesteru o tloušťce 25 mm s různým počtem vlákněných vrstev 10, 15 a 20.

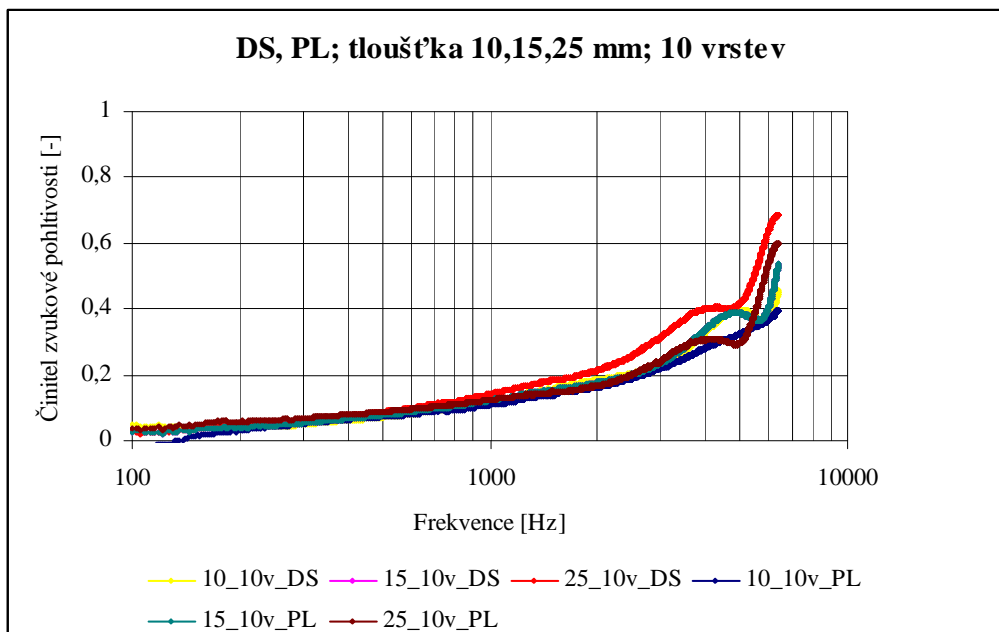


**Obr. 29:** Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z druhotných surovin a polyesteru o tloušťce 10 mm s různým počtem nanovláknenných vrstev 10, 15 a 20.

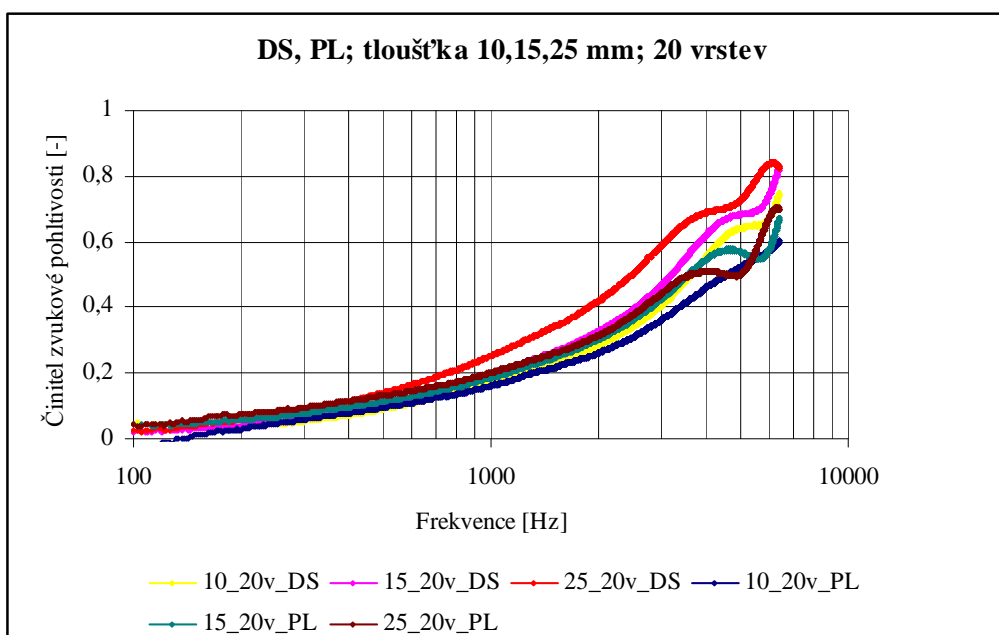


**Obr. 30:** Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z druhotných surovin a polyesteru o tloušťce 25mm s různým počtem nanovláknenných vrstev 10, 15 a 20.

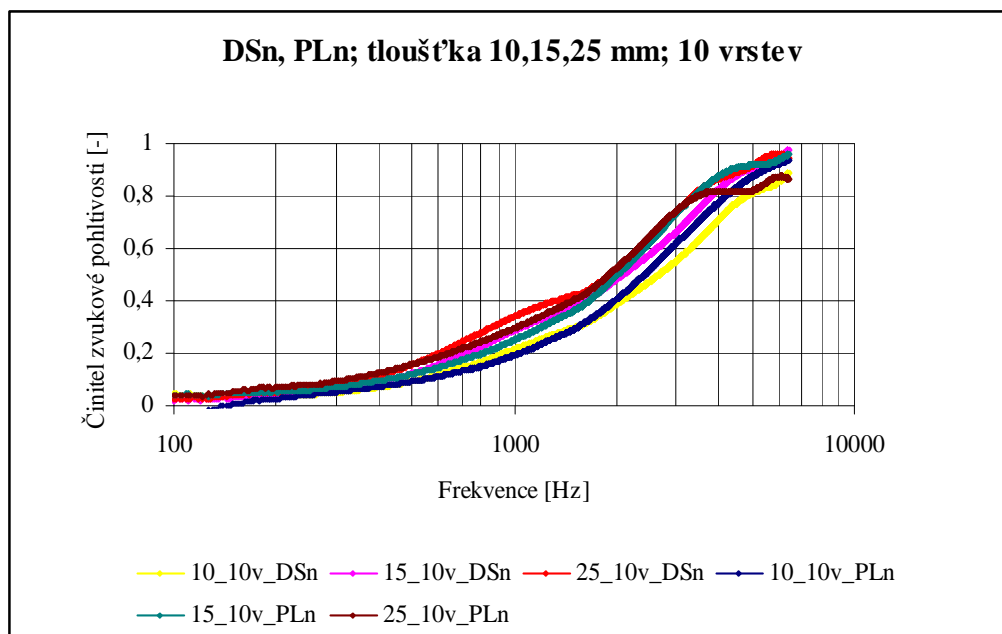
## Příloha č. 3



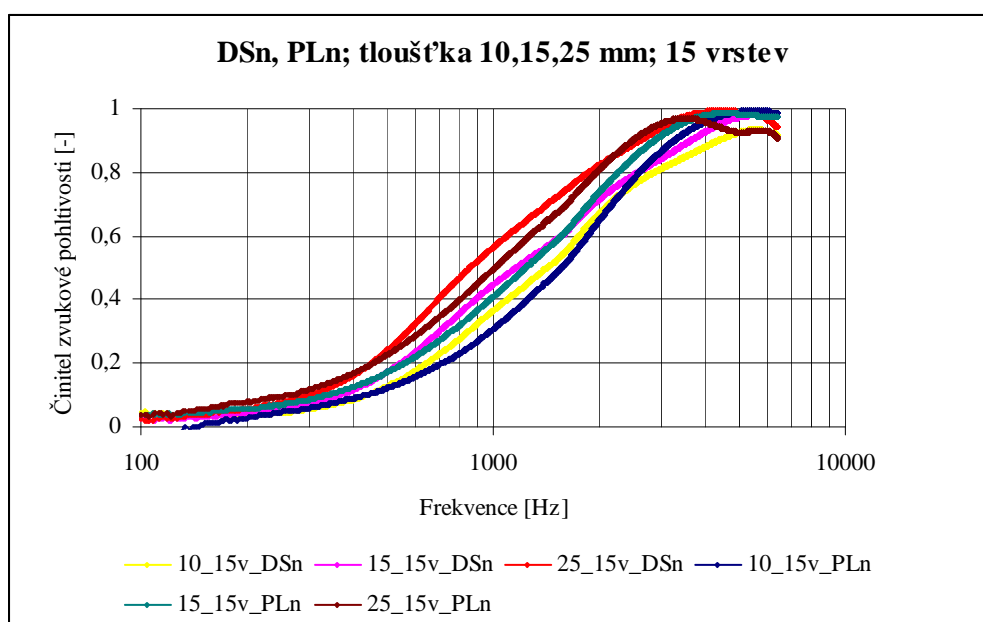
**Obr. 31:** Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z druhotných surovin a polyesteru s 10 vláknennými vrstvami a tloušťkou 10, 15 a 25 mm.



**Obr. 32:** Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z druhotných surovin a polyesteru s 20 vláknennými vrstvami a tloušťkou 10, 15 a 25 mm.

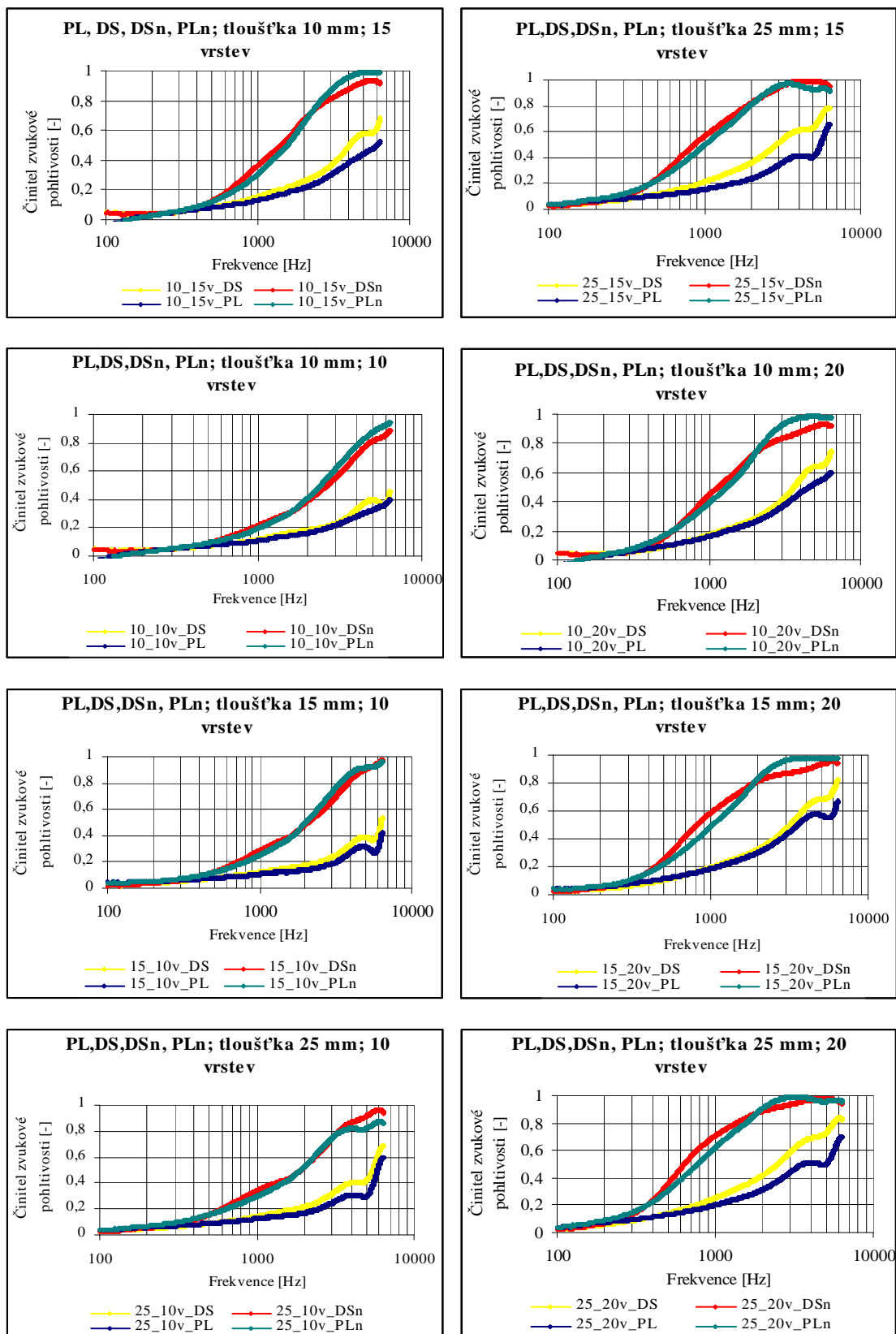


**Obr. 33:** Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z druhotných surovin a polyesteru s 10 nanovláknými vrstvami a tloušťkou 10, 15 a 25 mm.



**Obr. 34:** Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z druhotných surovin a polyesteru s 15 nanovláknými vrstvami a tloušťkou 10, 15 a 25 mm.

## Příloha č. 4:



**Obr. 35:** Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky z PL, PLn, DS a DS s různým počtem vrstev a různou tloušťkou.

**Příloha č. 5:**

Složení vodného zvlákňovacího roztoku PVA:

- 350 ml polyvinylalkoholu PVA (16%)
- 3,36 ml glyoxalu (40%)
- 1,75 ml kyseliny fosforečné  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (85%)
- 84 ml destilované vody



## Příloha č. 6:

*Tab. 2 - Plošné hmotnosti jednotlivých vzorků.*

Typ materiálu	Označení vzorku	Plošná hmotnost [g/m <sup>2</sup> ]	Typ materiálu	Označení vzorku	Plošná hmotnost [g/m <sup>2</sup> ]
NT z PL vláken	10_10v	214,7	NT z DS	10_10v	177,9
	10_15v	302,5		10_15v	301,1
	10_20v	440,3		10_20v	365,6
	15_10v	201,9		15_10v	169,1
	15_15v	309,0		15_15v	292,1
	15_20v	466,6		15_20v	373,4
	25_10v	207,7		25_10v	172,2
	25_15v	297,8		25_15v	298,1
	25_20v	390,4		25_20v	371,3
NT z PL s nanovláknennými vrstvami	10_10v	246,0	NT z DS s nanovláknennými vrstvami	10_10v	219,2
	10_15v	399,2		10_15v	323,5
	10_20v	514,8		10_20v	472,9
	15_10v	288,8		15_10v	237,2
	15_15v	405,5		15_15v	326,1
	15_20v	522,7		15_20v	472,6
	25_10v	263,6		25_10v	208,0
	25_15v	385,8		25_15v	346,1
	25_20v	506,3		25_20v	476,9